

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (СПбГУ)**

Выпускная квалификационная работа на тему:
**РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНО-СДВИГОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ**

по направлению подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»
образовательная программа бакалавриата СВ.5021.* «Гидрометеорология»
профиль: гидрология

Выполнила:
студентка 4 курса
очного отделения
Куrowsкая Виктория Антоновна

Научный руководитель
к. г. н., доцент
Виноградова Татьяна Александровна

Санкт-Петербург

2017

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Общие понятия о селевых потоках.	4
Глава 2. Описание методов расчета.....	10
2.1.1. Селевой эксперимент в бассейне реки Чемолган.....	10
2.1.2. Данные по экспериментам.....	12
2.2.1 Модель транспортно-сдвигового процесса.....	13
2.2.2. Результаты расчетов с применением модели Ю.Б. Виноградова	16
2.3.1. Модель неустановившегося движения воды.	20
2.3.2. Разбивка объекта на расчетные участки	23
2.3.3. Выбор расчетных интервалов времени и шагов по длине.	24
2.3.4. Боковой приток и отток.	25
2.3.5. Характеристики гидравлических сопротивлений русла.....	25
2.3.6. Начальные и граничные условия. Условия сопряжения.	26
2.3.7. Алгоритм решения разностных уравнений.	28
Глава 3. Физико-географическое описание объектов.....	32
3.1. Рельеф.....	34
3.2. Климат	35
3.3. Почвы и растительность.	37
3.4. Селевые потоки в русле ручья Чат-Баш.....	38
3.5. Селевые потоки в русле реки Баддон.	39
Глава 4. Результаты моделирования.....	42
4.1. Моделирование неустановившегося движения воды для участка реки Ардон	42
4.2. Расчет скоростей движения наносоводного селевого потока по формулам В.В. Голубцова и И.И. Херхеулидзе.	48
4.3. Моделирование неустановившегося движения воды для участка реки Ардон с изменением коэффициента шероховатости.	50
4.4. Моделирование неустановившегося движения воды на руч. Чат-Баш.....	53
4.5. Расчет скоростей движения наносоводного селевого потока по формулам В.В. Голубцова и И.И. Херхеулидзе.	56
4.6. Моделирование неустановившегося движения воды для участка ручья Чат-Баш с изменением коэффициента шероховатости.	57
Заключение	60
Список литературы	62

Введение

Селевые потоки — это катастрофическое явление природы, поражающее своими масштабами и последствиями. Всего с 1990 по 2013 год было зафиксировано 1420 чрезвычайных ситуаций, связанных с селевыми потоками и паводками, что составляет 30 процентов от общего числа чрезвычайных ситуаций. В России до 20 % территории находится в селеопасных зонах. Особенно активно селевые потоки формируются в Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Дагестане, в районе Новороссийска, Саяно-Байкальской области, зоне трассы Байкало-Амурской магистрали, на Камчатке в пределах Станового и Верхоянского хребтов. Еще в 1966 г. на территории СССР было зарегистрировано более 5 тысяч селевых бассейнов, и их число неизменно растет. Само слово сель берет свои корни из арабского языка, где سيل переводится как «бурный поток». По словам Ю.Б. Виноградова сель- это горный поток, состоящий из смеси воды и рыхлообломочной породы.

Целью данной курсовой работы являлся расчет транспортно-сдвигового процесса движения селевого потока. При этом выполнялись следующие задачи:

1. Анализ методов исследования селевых потоков, включая экспериментальные.
2. Приводится модель транспортно-сдвиговых селевых потоков и анализ основных характеристик селя.
3. Расчет наносоводных селей при задании различных параметров
4. Анализ полученных результатов исследования

Глава 1. Общие понятия о селевых потоках.

Сели классифицируются на различные типы и характеры в зависимости от состава и условий образования, но в любом случае это горные потоки, состоящие из рыхлообломочного материала и воды. В зависимости от состава и плотности селевой массы выделяются следующие типы селей:

- 1) Наносоводный - смесь воды с преимущественно крупными камнями, в том числе с валунами и со скальными обломками. Формируется во время прохождения сильного паводка при срыве обломочного материала. Объемный вес $1,1 - 1,5 \text{ т/м}^3$.
- 2) Грязевой - смесь воды с твердой фазой глинистых и пылеватых частиц при небольшой концентрации камней, обладающая высокой плотностью. Объемный вес $1,5 - 2,0 \text{ т/м}^3$.
- 3) Грязекаменный - смесь воды, мелкозема, гальки, гравия, небольших камней. В потоке могут также появляться крупные камни. Такой сел обладает предельно высокой плотностью. Объемный вес $2,1 - 2,5 \text{ т/м}^3$ [1].

Также по состоянию воды в потоке сели классифицируются на:

- 1) Связанные (структурные) потоки состоят из смеси воды, глинистых и песчаных частиц. Раствор имеет свойства пластичного вещества и движется, как единое целое. Во время движения по руслу такой поток разрушает и выпрямляет некоторые участки, а также переваливает через препятствия.
- 2) Несвязанные потоки отличаются большой скоростью перемещения. Обломочный материал в потоке постоянно соударяется, истирается и соответственно видоизменяется. В качестве связующего элемента выступает большое количество воды. Поток в основном следует изгибам русла, местами разрушая его.

В зависимости от механизма возникновения селей используется классификация, приведенная в таблице ниже [11]:

Таблица 1. Классификация селей на основе первопричин возникновения.

Типы	Первопричины	Распространение и зарождение
1. Дождевой	Ливни, затяжные дожди	Самый массовый на Земле тип селей образуется в результате размыва склонов и появления оползней
2. Снеговой	Интенсивное снеготаяние	Происходит в горах Субарктики. Связано со срывом и переувлажнением снежных масс
3. Ледниковый	Интенсивное таяние снега и льда	В высокогорных районах. Зарождение связано с прорывом талых ледниковых вод
4. Вулканогенный	Извержения вулканов	В районах действующих вулканов. Самые крупные. Вследствие бурного снеготаяния и прорыва кратерных озер
5. Сейсмогенный	Сильные землетрясения	В районах высокой сейсмичности. Срыв грунтовых масс со склонов
6. Лимногенный	Образование озерных плотин	В высокогорных районах. Разрушение плотин
7. Антропогенный прямого воздействия	Скопление техногенных пород. Некачественные земляные плотины	На участках складирования отвалов. Размыв и сползание техногенных пород. Разрушение плотин
8. Антропогенный косвенного воздействия	Нарушение почвенно-растительного покрова	На участках сведения лесов, лугов. Размыв склонов и русел

Селевой очаг – морфологическое образование, способное концентрировать сток, вмещающее ПСМ и имеющее достаточный уклон для развития сдвигового или транспортно-сдвигового селевых процессов и, тем самым, для формирования грязевого или грязекаменного потоков высокой плотности. Выделяет два генетических типа селевых очагов: селевой очаг обводнения и взаимодействия.



Рисунок 1. Селевой очаг в верховье р. Малка [9].

Также выделяют несколько ландшафтных типов селевых очагов:

1. Действующие

Селевые обнажения

Селевые врезы

Селевые рытвины

2. Потенциальные (без видимых следов селевой деятельности)

Залесенные селевые ложбины

Задернованные селевые ложбины

Селевые ложбины с осыпными и курумными склонами

Селевые ложбины в скальных и полускальных массивах

Селевые ложбины на уступах морен

Селевые обнажения – морфологические образования, возникшие в результате сноса почвенно-растительного покрова и рыхлообломочной

породы при сдвиговом селевом процессе в случаях, когда подстилающие скальные породы или относительный водоупор, совпадающий с поверхностью скольжения, залегает неглубоко и днища ложбин достаточно широки («плоский» ПСМ).

Селевые врезы – мощные морфологические образования, выработанные обычно в толще древних моренных отложений и чаще всего, приуроченные к резким перегибам рельефа; возникают в результате проявления сдвигового и транспортно-сдвигового селевых процессов. Глубина измеряется несколькими десятками метров.

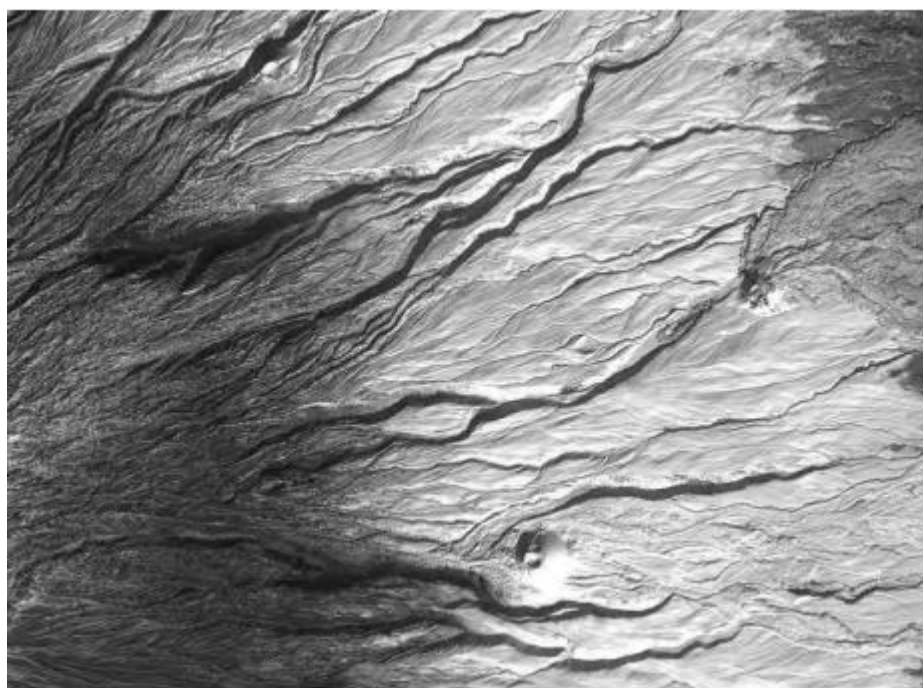


Рисунок 2. Часть восточного сектора вулкана Ключевской с многочисленными врезами, образующими «селевой бедленд». Космический снимок IRS-P5 (Cartosat-1), 11 октября 2007 г. Снимок предоставлен ИТЦ «СканЭкс» [10].

Селевые рытвины – линейные морфологические образования, прорезающие элювиально-делювиальные рыхлообломочные отложения. Возникают также в результате проявления сдвигового и транспортно-сдвигового селевых процессов [1].

Различаются следующая классификация селевых потоков по типу потенциальной селевой массы:

1. ПСМ обводнения
2. Взаимодействия
3. Вовлечения
4. Аллювиальный, пролювиальный или аллювиально-пролювиальный

Селевой водосбор –бассейн, содержащий стокообразующие поверхности и способный сформировать наносоводный селевой поток. Обычно – это водосборы поверхностного стока. Водосбор селевого очага – часть селевого бассейна, принимающая непосредственное участие в питании селевого очага водой. В их пределах может формироваться как поверхностный, так и почвенный, и грунтовый сток [1].

Формирование селей происходит в селевых водосборах, наиболее распространенной формой которых в плане является грушевидная с водосборной воронкой и веером ложбинных и долинных русел, переходящих в основное русло. Селевой водосбор подразделяется на три основные зоны:

1. зона селеобразования (питания селей водной и твердой составляющей);
2. зона транзита (движения селевого потока);
3. зона разгрузки (массового отложения селевых выносов).

Для возникновения селя необходимо одновременное наличие следующих условий:

1. На склонах селевого бассейна должно присутствовать достаточное количества легко перемещаемого обломочного материала, который может быть представлен песком, галькой, гравием.
2. Большой объем воды для смыва со склонов камней и грунта и их перемещение по руслу, что в свою очередь может быть вызвано интенсивными ливнями, бурным таянием ледников или сезонных снегов.
3. Достаточная крутизна склонов селевого бассейна. Минимальный уклон составляет 10-15 градусов.

Что касается селевых процессов, то по терминологии, рекомендуемой «Руководством по изучению селевых потоков» (1976 г.) различают три типа селевых процессов:

1. Транспортный
2. Эрозионно-сдвиговый (транспортно-сдвиговый)
3. Сдвиговый

Сдвиговый процесс ($\alpha > \alpha_1$) появляется в условиях заполнения ложбины обломочным материалом, чей угол наклона больше критического. Во время поступления осадков в толще ПСМ (потенциальная селевая масса) возникает поток грунтовых вод, что приводит к движению массива. Сдвиговый процесс участвует в формировании грязекаменных и грязевых селей и имеет различные проявления. Местные природные условия на водосборе, такие как тип рельефа, характер почв и растительности, состав и свойства горных пород, особенности гидрографии приносят свою специфику данному процессу. Первая подвижка ПСМ происходит во время сильного ливня, при условии, что ложбины и кулуары, заполнены продуктами разрушения скальных или полускальных гряд и массивов, и обычно случается где-либо в их верхней части, где мощность обломочной породы ниже, сама ложбина уже, уклон больше [1].

Транспортный селевой процесс ($\alpha < \alpha_2$). Селевые потоки высокой плотности, возникающие в средней горной зоне и являющиеся результатом развития транспортно-сдвиговых селевых процессов, относятся к наиболее часто встречающимся и приводящим к наибольшим негативным последствиям. Важной особенностью транспортно-сдвигового процесса является взаимодействие водного потока и породы. Б.С. Степанов, В.П. Молчанов и Т.Л. Киренская отмечают, что важнейшей особенностью данного процесса является формирование селевой массы высокой плотности (2200-2500 кг/м³).

Глава 2. Описание методов расчета.

Методы исследования селевых потоков подразделяются на расчетные и экспериментальные, выбор которых в свою очередь зависит от характеристик самого селя, а также возможностей исследования.

2.1.1. Селевой эксперимент в бассейне реки Чемолган.

Эксперимент воссоздания селевого потока искусственным путем был организован Ю. Б. Виноградовым в 1972-1975 годах на территории Заилийского Алатау в верховьях реки Чемолган в 50 км от Алма-Аты. Бассейн реки Чемолган, вытянутый в узкой полосе с юга на север, граничит с бассейном реки Узун-Каргалы на западе и с Каскелен на востоке. Селевой очаг представлял собой грандиозный врез, рассекающий уступ древней ледниковой морены; его длина составляла 930 м, средняя ширина по верху- 95 м и средняя глубина- 45 м. Он был расположен на наиболее крутой части уступа четвертичной морены на высоте 2644-2900 м. Ниже селевого очага на высоте 2644 м русло было ограничено выходами коренных пород, формирующих несколько водопадов. Общая длина русла составляет 760 м со средним градиентом уклона в 11.5 [4].



Рисунок 3. Очаг селевого потока со спутникового снимка.

Длина нижней части русла составляла 510 м, а градиент уклона в 7.5. Поток заканчивался слиянием с Левым Чемолганом. Ниже располагался

конус выноса со средней шириной в 15 м, максимальная составляла 260 м, при этом средний градиент равнялся 50 [4].

В нижней части русла на расстоянии в 1,7 км от плотины были установлены приборы для измерения расхода потока по длине створа. Над ними возвышалась конструкция для измерения динамического воздействия селевого потока, представляющая собой бетонный монолит со стальным листом толщиной в 4 мм со встроенными динамометрическими цилиндрами. Средняя высота конструкции составляла 1,2 м, ширина - 0,6 м. Датчики деформации были разработаны таким образом, что могли выдержать силу в $6 \cdot 10^5$ Н. В первые секунды эксперимента приложенная сила оказалась больше замеренного и динамометры были отключены. В 1973 году во время проведения эксперимента записывающие устройства были установлены в безопасном месте на специальной опоре, так что информация от сенсоров поступала через трансмиттер на нескольких частотах. Позднее данная конструкция была уничтожена также, как и в 1972 году, само устройство было унесено потоком [4].

Для измерения динамического давления внутри потока применялся алюминиевый шар диаметром в 0.5 м и массой в 186 кг, который крепился на массивном якоре со стальным кабелем толщиной в 18 мм и длиной в 30 м. Кабель мог выдержать силы в 105 Н, но под воздействием потока он был разорван [4].

Все попытки измерить плотность селевого потока сбором массы с помощью измерительного контейнера оказались неэффективными. С 1973 года для измерения плотности потока были использованы специальные сенсоры, бесконтактный метод которых подразумевал использование радиоволн. Также был разработан магнитометрический метод для разрешения данной задачи.

2.1.2. Данные по экспериментам.

В общей сложности было проведено 5 экспериментов, первый начался 27 августа 1972 года. Наибольшее значения стока грязекаменного потока насчитывало 120 м³/с. 32,8 тысяч м³ наносов прошли через линию измерения характеристик селя. Средняя плотность селевого потока составила 2070 кг/м³ [4]. На поверхности отмечалось значительное количество глыб, диаметр которых оказывался меньше чем, глубина потока, что было расценено, как признак селя высокой плотности.

Второй эксперимент на Чемолгане был проведен 22 августа 1973 года. Было произведено три попуска (таблица 2) с трехминутным интервалом, из которых последний был с постоянным стоком и самый продолжительный. В этот раз с очага было вынесено 102 тысячи м³ наносов. [4]. Увеличение характеристик грязекаменного потока по сравнению с первым экспериментом было связано с высвобождением селевой массы в несколько этапов с перерывами, которые нарушили равновесие псм.

Таблица 2. Характеристика водного режима [4].

Год эксперимента	№ попуска	Время, минуты	Объем, тысячи м ³	Максимальный расход, м ³ /с
1972	1	18,5	11,8	16,0
1973	1	2,5	1,7	16,2
	2	10,0	7,3	15,8
	3	9,0	5,3	12,1
	4	222	24,9	2,1
1975	1	6	10,0	28,0
	2	6	5,0	15,0
1976	1			5,0
1978	1			9,0

Третий эксперимент был проведен 19 августа 1975 года, когда было произведено два попуска с начальным объемом воды в резервуаре в 60 тысяч м³. Два мощных грязекаменных потока прошли друг за другом с 50

минутным интервалом. В широкой долине реки Чемолган фронт потока постепенно освобождался от крупных валунов и имел скорость на верхнем 5-километровом участке (5-60) 4.0 м/с, на нижнем 18 км (3-40) и 1.9 м/с [4].

8 ноября 1976 года состоялся 4 эксперимент. Из-за влияния погодных условий в резервуаре содержалось лишь 13.2 тысяч м³ воды. [4].

Пятый эксперимент проводился 9 сентября 1978 года. Селевой поток прошел линию измерений длиной 134 м и со средней скоростью 4.3 м/с (таблица 3)

Таблица 3. Характеристики селевого потока [4].

Год эксперимента	Объем, тысячи м ³	Средняя плотность потока, кг/м ³	Высота волны, м	Средняя скорость, м/с	Максимальный расход, м ³ /с
1972	41,8	2070		9,0	120
1973, попуск 1-3	63,3	2120			100
1973, попуск 4	72,8	1970			18
1975	72,0	2160	4,0	6,3	380
1976	18,0	2200	2,0	4,5	45
1978	13,0	2400	2,8	4,3	130

В результате проведения экспериментов была получена информация о физических процессах, происходящих при вовлечении массы горной породы в селевой поток. Это позволило создать математическую модель селевого процесса, названного транспортно-сдвиговым.

2.2.1 Модель транспортно-сдвигового процесса.

Данная модель была разработана Ю.Б. Виноградовым для селевых потоков высокой плотности, возникающих в средней горной зоне ($\alpha_1 \geq \alpha \geq \alpha_2$) в результате развития транспортно-сдвигового процесса. При создании данной модели были приняты следующие положения:

1. Коэффициент неустойчивости ПСМ задавался, как обратная величина известного в механике грунтов и инженерной геологии коэффициента устойчивости склонов массивов рыхлообломочных пород.

$$K = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \varphi .$$

2. Элементарная потенциальная мощность потока (способность произвести работу на единице пути за единицу времени, Вт / м = кг · м/с³) :

$$U = g [Q \rho_0 + (\zeta \rho_0 + \rho) G] \sin \alpha$$

3. Показатель подвижности селевой массы.

$$R_2 = \exp \{ - [0,614 / (1 + 10 \zeta)] (G / Q) \} .$$

С увеличением плотности селевой массы, а следовательно снижением подвижности потока его размывающая способность падает, что и достигается введением коэффициента R , который изменяется от 0, когда плотность достигает предела текучести, до 1 при $\gamma = \rho_0$ (водный поток). Допустим, что увеличение расхода твердого материала, вовлекаемого в зарождающийся селевой поток по мере его продвижения по тальвегу селевого очага, прямо пропорционально коэффициенту неустойчивости ПСМ K , элементарной мощности потока U и коэффициенту подвижности селевой массы R_2 :

$$dG / dl = c_2 K V R_2 , \quad (2.1)$$

где l – расстояние по тальвегу селевого очага.

Тогда общая форма рабочего дифференциального уравнения такова:

$$dG/dl = c_2 (\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \varphi) g \sin \alpha [Q \rho_0 + (\zeta \rho_0 + \rho) G] \exp \{ - [0,614 / (1 + 10 \zeta)] (G / Q) \}. \quad (2.2)$$

К сожалению прямое его решение относительно искомой величины G невозможно и имеет следующий общий вид:

$$f(G) = f(G_0) + A (l - l_0), \quad (2.3)$$

где $A = c_2 (\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \varphi) g \sin \alpha$. При дальнейших преобразованиях уравнения принимают следующий вид:

$$f(G) = S (Z_0 + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n);$$

$$S = [1 / (\rho + \zeta \rho_0)] \exp [- 0,614 / (1 + 10 \zeta) (\zeta + \rho / \rho_0)];$$

$$Z_0 = \ln [Q \rho_0 + (\zeta \rho_0 + \rho) G];$$

$$Z_i = \{0,614[1/(\zeta + \rho/\rho_0) + (G/Q)]\}^i / (1 + 10\zeta)^i \cdot i \cdot i!,$$

где ! – знак факториала, а i – принятое число членов сходящегося ряда, при вычислениях с помощью уравнения (4.6). Одним из методов решения системы (4.6) представляется способ обратных оценок аргумента l при задаваемых величинах G . Вводится серия полезных показателей, характеризующих соотношение воды и твердого вещества (горной породы) в селевой массе:

1. объемная доля воды: $\theta_1 = (Q + \xi G) / [Q + (1 + \xi)G]$

2. объемная доля твердого вещества: $\theta_2 = G / [Q + (1 + \xi)G]$

3. отношение объема воды к объему твердого вещества:

$$\theta_3 = (Q + \xi G) / G = (Q/G) + \xi.$$

4. отношение объема твердого вещества к объему воды:

$$\theta_4 = G / (Q + \xi G).$$

Также вводятся следующие величины:

1. Расход селевого потока в процессе его движения в селевом очаге:

$$Q_c = Q + (1 + \zeta) G.$$

В данном случае Q – расход воды, поступивший в селевой очаг.

2. Плотность селевой массы потока в процессе его движения в селевом очаге:

$$\gamma_c = \frac{\rho_0 Q + (\zeta_{ПСМ} \rho_0 + \rho) G}{Q + (1 + \zeta_{ПСМ}) G}.$$

3. Соотношение между плотностью селевой массы и объемной долей воды в последней:

$$\theta_1 = (\rho - \gamma_c) / (\rho - \rho_0),$$

$$\gamma_c = \theta_1 \rho_0 + (1 - \theta_1) \rho$$

Моделирование осуществляется по следующей схеме:

1. Врезы, ложбины, рытвины разбиваются на характерные участки с однородными морфометрическими показателями.

2. Для каждого участка последовательно сверху вниз ведется расчет основной переменной G , а также зависящих от нее величин расхода и плотности селевого потока.
3. Величина G_0 – это начальное значение переменной G для определенного участка и результат расчета для ему предшествующего. Для первого верхнего участка $G_0=0$.

В результате мы получаем достаточно сглаженный гидрограф селевого очага на выходе или же в зоне транзита. По экспериментальным данным проводился расчет расхода селевого потока и дальнейшее сравнение с натурными данными, приведенное в таблице ниже.

Таблица 4. Сравнение результатов. [4]

Год эксперимента	1972	1973, попуск 1-3	1973, попуск 4	1975	1976	1978
Максимальный измеренный	120	100	18	380	45	130
Максимальный рассчитанный	118	109	18	241	43	81

2.2.2. Результаты расчетов с применением модели Ю.Б. Виноградова

В данной модели задаются специальные соотношения для оценки критического расхода и уклона. Рассмотрим влияние различных факторов на величину критических расходов на примере данных по Чемолганскому эксперименту из статьи Ю.Б. Виноградова «Транспортный и транспортно-сдвиговый селевые процессы».

1. Критические расходы и уклоны. Исходная информация: $\rho_0=1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$; $\varphi_m=35^\circ$; $\varphi_m^*=22^\circ$; $c_m=10000 \text{ Н/м}^2$; $d_m=0.7\text{м}$; $\varepsilon^*=0.5$; $B=10\text{м}$; $h=3\text{м}$. Результаты расчета: $\alpha_1=13^\circ$; $\alpha_2=30^\circ$; критерий $\xi=25^\circ$; критические расходы (таблица 5)

Таблица 5. Значения критических расходов в зависимости от угла наклона ПСМ [8].

Угол наклона ПСМ, °	30	20	15	10	5	2	1	0.5
Критический расход, м³/с	0.8	5.2	9.1	31	164	884	4970	28700

Необходимо отметить, что, начиная примерно с 5° , критический расход будет резко возрастать, так как поток будет не в состоянии проходить в русле, шириною 10 м. Таким образом, можно говорить о том, что на малых уклонах поток будет не способен переносить валуны, высотой 0,7 м.

- Влияние уклона и влажности ПСМ на расход селевого потока. Исходная информация: $\rho_o=1000 \text{ кг/м}^3$; $p=2700 \text{ кг/м}^3$; $\varphi_m=35^\circ$; диапазон изменения уклона $13\text{-}30^\circ$; $l-l_o=1000\text{м}$; $Q=50 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_1=5 \cdot 10^{-6} (\text{м} \cdot \text{с}^2)/\text{кг}$; $\varepsilon=0.167$; $\gamma_{п.т.}=2500 \text{ кг/м}^3$; расчеты ведутся для трех «характерных» значений влажности ПСМ; $\zeta_1=0$, сухой ПСМ; $\zeta_2=0.133$, содержание влаги в ПСМ на пределе текучести при $\gamma_{п.т.}=2500 \text{ кг/м}^3$; $\zeta_3=0.200$, высокое увлажнение ПСМ (полная влагоемкость при $\varepsilon=0.167$).

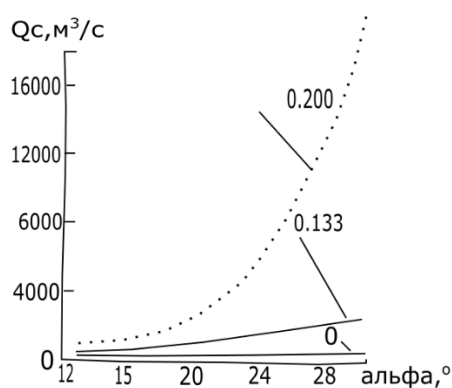


Рисунок 4. Влияние уклона и влажности ПСМ на расход селевого потока.

Можно говорить о том, что уклон и предварительное увлажнение ПСМ оказывают несомненно сильное воздействие на величину критических расходов [8].

- Влияние величины расхода воды на расход селевого потока и плотность селевой массы при различной длине участка. Исходная информация: $\varphi_m=35^\circ$; $\rho_o=1000 \text{ кг/м}^3$; $p=2700 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_{п.т.}=2500 \text{ кг/м}^3$; $\alpha=20^\circ$; $c_1=5 \cdot 10^{-6}$

(м*с²)/кг; $\varepsilon=0.167$; $Q_{кр}=5 \text{ м}^3/\text{с}$; $l_1-l_0=100\text{м}$; $l_2-l_0=1000\text{м}$; $\zeta_1=0$; $\zeta_2=0.133$; $\zeta_3=0.200$. Результаты расчетов можно видеть на рисунках.

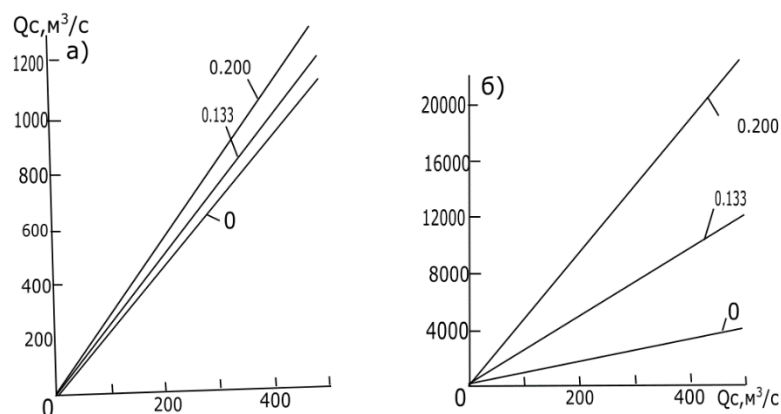


Рисунок 5. Зависимость селевого расхода от водного и влажного ПСМ в конце 100-метрового (а) и 1000-метрового (б) участков.

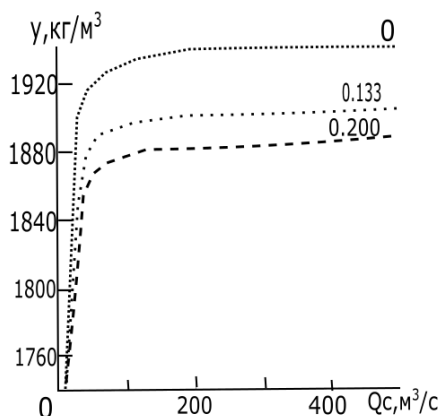


Рисунок 6. Зависимость плотности селевой массы от водного расхода при различном увлажнении ПСМ

Для 1000-метрового участка зависимость плотности селевой массы от Q не представлена, так как она практически идентична для всех Q и равна 2490 (при $\zeta=0$), 2435 (при $\zeta=0.133$) и 2390 $\text{м}^3/\text{с}$ (при $\zeta=0.200$).

4. Изменение Q_c , γ , dG/dl по длине ПСМ. Исходная информация: $\varphi_m=35^\circ$; $\rho_o=1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $p=2700 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\gamma_{п.т.}=2500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\alpha=20^\circ$; $c_1=5 \cdot 10^{-6} (\text{м} \cdot \text{с}^2)/\text{кг}$; $\varepsilon=0.167$; $Q_{кр}=5 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q=50 \text{ м}^3$; $\zeta_1=0$; $\zeta_2=0.133$; $\zeta_3=0.200$. Итоги представлены на рисунках [8].

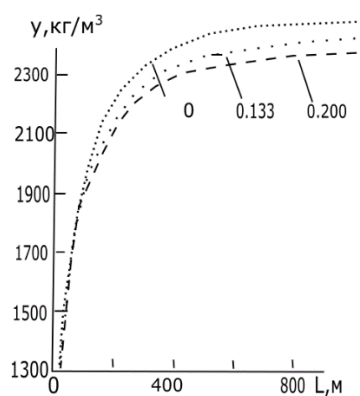


Рисунок 7. Изменение плотности селевого потока по длине очага при различном увлажнении ПСМ

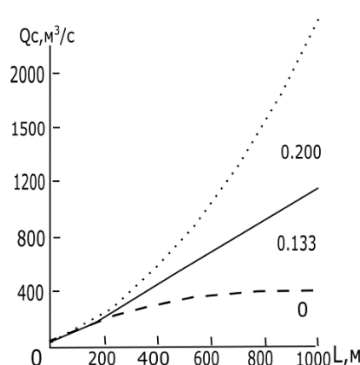


Рисунок 8. Изменение селевого расхода по длине очага при различном увлажнении ПСМ

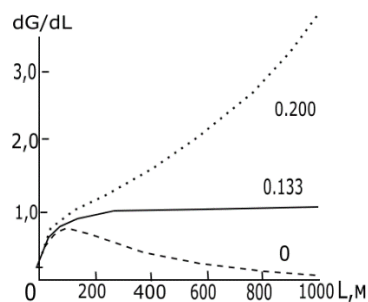


Рисунок 9. Изменение dG/dL по длине очага при различной увлажненности ПСМ.

Особый интерес представляют функции $dG/dL=f(l, \zeta)$, которые в свою очередь поясняют внутреннюю суть транспортно-сдвигового процесса, описанного в модели Ю.Б. Виноградова. Вид вышенаписанной функции при слабом увлажненном ПСМ подтверждаются данными, полученными на Чемолганском полигоне.

2.3.1. Модель неустановившегося движения воды.

Для расчета селей на выбранных объектах была использована модель неустановившегося движения воды, разработанная Виноградовой Т.А. и применяемая в настоящее время для расчетов наносоводных селей такими крупными компаниями, как ОАО «Севкавгипроводхоз». Описание модели расчета неустановившегося движения воды взято из статьи Виноградовой Т.А. и Никифоровской В.С. «О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах» 2015 года. Данная модель основывается на строгих методах расчета, то есть на решении одномерной системы уравнений Сен-Венана. При расчетах неустановившегося движения воды чаще всего используют одномерную модель, так как даже при одномерной идеализации существует целый ряд проблем задания исходной информации. В основе модели лежат дифференциальные уравнения неустановившегося движения воды в открытых руслах при наличии бокового притока в следующем виде:

$$I = i_o - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\alpha}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{g\omega} \quad \text{уравнение динамического равновесия (2.4)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{уравнение неразрывности (2.5)}$$

Независимыми переменными в написанных выше уравнениях являются координаты x и время t , а их функциями – глубина h и средняя скорость V . При заданной форме русла площадь живого сечения ω в определенном створе является функцией глубины, в то время как расход задается, как произведение V и ω . C представляет собой коэффициент Шези, а R – гидравлический радиус (в случае широкого и открытого русла заменяется глубиной h), g – ускорение свободного падения, α и β – коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению, q представляет собой боковую приточность на единицу длины. Надо отметить, i_o в первом уравнении задает уклон дна, а

$\partial h / \partial x$ - дополнительный уклон, который учитывает изменение глубин по длине русла. Последний член играет большую роль на участках с резким изменением сечения русла. Уклон, связанный с изменением скоростей во времени представлен в виде второго слагаемого в правой части, он приобретает большие значения в зонах резко неустановившегося движения воды. Первое и второе слагаемые справа это инерционные члены уравнения, которые рассматривают влияние скоростей частиц воды на само неустановившееся движение. В то время как третье слагаемое подразумевает собой уклон трения, который влияет при расчетах для речных бьефов.

При использовании данного уравнения применяются обязательные допущения, такие как:

1. Неустановившееся движения воды принимается, как одномерное, то есть при решении пренебрегают значениями поперечных и вертикальных составляющих скорости в открытом русле по сравнению с продольной. Также не учитывается поперечный уклон свободной поверхности воды (поверхность в любом случае принимается горизонтальной)
2. Движение принимается медленно изменяющимся, тогда местные потери напора можно не принимать в расчет.
3. Используется гипотеза длинных волн, которая подразумевает, что глубина воды считается малой по сравнению с длиной волны, что позволяет не учитывать избыточное давление за счет ускорения воды в вертикальном направлении.
4. Силы сопротивления вводятся в уравнения в таком же виде, как и для равномерного движения.
5. Уклон дна принимается малым по сравнению с единицей.

Также русло считается достаточно прямым, то есть если его развернуть в прямую линию, что это не вызовет последующих ошибок в расчетах. Кроме этого необходимо учитывать, что при наличии бокового притока массы воды

поступают в главное русло с берегов или из притоков с нулевой скоростью, это относится также и к оттоку воды из главного русла. При решении уравнения Сен-Венана использовалась численная схема, разработанная в Институте гидродинамики СО АН СССР (ИГ). Уравнения неустановившегося движения берутся в форме законов сохранения:

$$\frac{1}{g\omega}\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + 2V\frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \left[1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2\right]\frac{\partial Z}{\partial x} = \left[i_o + \frac{1}{B}\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)_{h=const}\right]\left[\left(\frac{V^2}{C}\right) - \frac{Q|Q|}{K^2}\right] \quad (2.6)$$

$$B\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q.$$

Таким образом, при решении данных уравнений счет ведется по неявной разностной схеме. В процессе расчета производные заменяются разностными отношениями и происходит переход к матричным обозначениям, вводится

вектор: $\tilde{U}_n = \begin{pmatrix} \tilde{Q}_n \\ Z_n \end{pmatrix}$. В итоге мы получаем следующую систему:

$$A_n \tilde{U}_{n+1} + D_n \tilde{U}_n + R_n \tilde{U}_{n-1} = E_n \quad (2.7)$$

где A_n, D_n, R_n, E_n выражаются через параметры русла и элементы режима в точке n . Система разностных уравнений (2.4) решается методом прогонки. Решение предстает в виде:

$$\tilde{U}_{n-1} = L_{n-1/2} \tilde{U}_n + T_{n-1/2},$$

где $L_{n-1/2}$ и $T_{n-1/2}$ — так называемые прогоночные коэффициенты. Таким образом, для определения \tilde{U}_n необходимо определить $L_{n-1/2}$ и $T_{n-1/2}$ и значение \tilde{U}_{n-1} . Нахождение вышеперечисленных величин происходит следующим образом:

1. Прямая прогонка, а именно определение прогоночных коэффициентов для всех внутренних точек области

2. Вычисление U в последней точке области
3. Определение \tilde{U}_n для внутренних точек области – обратная прогонка.

Программа, составленная на основе упомянутой выше численной схеме, дает возможность расчета одного русла без разветвлений или же простейших схем русел, таких как слияние двух русел или раздвоение одного. Также есть возможность учитывать боковой приток или отток сосредоточенный, или равномерно распределенный. Задание расчётных параметров для модели производится на основе натурных данных. В качестве расчетных параметров принимаются длины расчетных участков, значения расчетных интервалов времени и шагов по длине, обобщенные морфометрические характеристики русла (аккумулирующие ёмкости, положения линии дна, принятое в расчете), характеристики гидравлических сопротивлений, схематизированные начальные и граничные условия и боковой приток или отток. Следует отметить, что состав и точность исходных данных зависят от специфики объекта, характера неустановившегося движения, принятого метода расчета, а также от поставленной задачи и необходимой точности ее решения.

2.3.2. Разбивка объекта на расчетные участки

При задании исходных параметров необходимо прежде всего разбить русло на расчетные участки, на которых наблюдается определенная закономерность изменения по длине морфометрических и гидравлических характеристик при различных условиях заполнения русла. Для решения данной задачи следует руководствоваться несколькими принципами:

1. В пределах участка не должно быть резкого изменения глубины или ширины русла. Поэтому в более сложных в морфометрическом плане руслах следует назначать более короткие расчетные участки.
2. При резко выраженном неустановившемся движении в створе возмущения есть смысл указывать в несколько раз меньше длину участков, нежели вдали от него.

3. В створе впадения притоков, чье влияние сказывается на расходах реки, обязательно назначается граница участков. Тот же принцип используется в створах гидроузлов, крупных водозаборов и сбросов, мостов и т.д.

Границы участков целесообразно привязывать к створам, для которых есть данные о расходах или данные наблюдений за неустановившемся режимом.

2.3.3. Выбор расчетных интервалов времени и шагов по длине.

При назначении расчетного интервала времени следует выбирать не слишком большое значение Δt для детального описания изменений расхода каждого попуска, половодья или же паводка, необходимо, чтобы продолжительность изменений расходов была в несколько раз больше расчетного интервала времени. При этом выбор слишком малого интервала времени влечет за собой увлечение трудоёмкости расчета. Поэтому иногда используют переменные значения Δt , которые уменьшаются в период резких изменения расхода.

Что касается морфометрических характеристик русла, то при использовании методов, в которых задается изменение поперечного сечения или ширины русла по длине реки, следует выбрать характерные поперечные сечения для границ расчетных участков. При задании площадей живых сечений на границах участков мы принимаем предположение о линейном изменении площадей сечений в пределах участка и о прямолинейности дна реки в заданных пределах. Используя эти допущения, можно найти объем воды на расчетном участке, как произведение полсуммы площадей живого сечения на концах участка на длину участка. В связи с тем, что естественное русло редко имеет форму, хорошо описываемую линейным изменением площадей сечения по длине реки и прямолинейным дном, возникают существенные ошибки.

2.3.4. Боковой приток и отток.

Как уже было сказано ранее, имеющийся боковой приток или же отток может быть задан, как сосредоточенный и распределенный.

Сосредоточенный задается в одном створе реки, например, впадение рек – притоков в основную, водозабор. Что касается распределенного, то данный приток схематизирует сток воды в основное русло с маленьких и мельчайших речек и ручейков.

2.3.5. Характеристики гидравлических сопротивлений русла.

Количественной характеристикой гидравлического сопротивления, как правило, является коэффициент Шези, обычно считаемым для каналов по формуле Маннинга. Значения коэффициентов шероховатости n для различной гладкости дна каналов следует брать из гидравлических справочников. Однако, эти данные будут не всегда надежны, особенно если расчет производится для поймы. В виду того, что гидравлические сопротивления для размываемых русел обуславливаются не только выступами шероховатостей дна и приближенных откосов, но и параметрами донных гряд, наиболее приближенное их описание требует статистического подхода. Значение коэффициента шероховатости можно находить на основе натурных данных: строение границ русла, характер берегов, наличие растительности, извилистость русла и тд. Но влияние всех этих факторов ведет к тому, что заданное значение n становится неопределенным. Вследствие чего используют другой способ определения значения n или заменяют его другим параметром. Так при наличии достаточно исходной информации возможно использование кривой расходов $Q = f(Z)$. При этом удобнее использовать не коэффициент шероховатости n , а непосредственно коэффициент Шези $C = V / \sqrt{hi}$ для широкого русла или (при отсутствии данных об уклоне) коэффициент Стивенса $M = C\sqrt{i} = V / \sqrt{h}$.

2.3.6. Начальные и граничные условия. Условия сопряжения.

Наиболее простым и часто встречаемым вариантом задания начальных условий является использование установившегося движения. При этом задается начальный расход Q_0 , а профиль свободной поверхности $Z_0(x)$ может быть вычислен одним из известных методов. Более сложным вариантом задания начальных условий является начальное неустановившееся движение, которое может быть задано либо в виде начального распределения расходов и уровней по длине участка, либо получается в результате расчета предыдущей волны неустановившегося движения, например, в случае наложения волн. В граничном условии во входном створе чаще всего задается гидрограф $Q = f(t)$. В нижнем граничном створе может задаваться условие постоянства уровня, что используется при расчетах впадении реки или канала в море, озеро или водохранилище значительного объема. В случае отсутствия створа впадения реки в водоем, принято задавать нижнее граничное условие в виде кривой расхода $Q = f(Z)$.

Рассматриваемая область состоит из двух типов элементов: участков водотоков (отрезков) и узлов разветвления (вершин), которые обозначают M и m соответственно. Неизвестные параметры на отрезках являются распределенными параметрами, а в вершинах сосредоточенными.

1. Начальные условия.

Для распределённых параметров начальные условия задаются на каждом i -ом отрезке в виде:

$$Q_i(x_i, t_i), Z_i(x_i, t_i), i = 1, 2, \dots, M;$$

а для сосредоточенных параметров – в каждой j -ой вершине:

$$Q_j(t_0), Z_j(t_0), j = 1, 2, \dots, m.$$

2. Граничные условия.

Для гидравлических уравнений во входных и выходных (так называемых “висячих”) вершинах ставится одно из следующих условий:

$Q_j(t)$, $Z_j(t)$, либо $Q(Z_j)$, где j – номер вершины.

3. Условия сопряжения.

Во внутренних вершинах рассматриваемой системы речных русел должны быть заданы условия сопряжения, получаемые из балансовых соотношений.

Для гидравлических уравнений имеем:

1. баланс расходов в узле:

$$\sum_{i \in \gamma_-^j} Q_i - \sum_{i \in \gamma_+^j} Q_i = Q_*^j - \Omega \frac{dZ_*^j}{dt},$$

где Q_*^j – сосредоточенный приток (отток) в j -ом узле; Z_*^j – уровень свободной поверхности воды в j -ом узле; Ω – площадь зеркала воды сосредоточенной ёмкости в j -ом узле (если таковая имеется); γ_+^j – множество отрезков, примыкающих к вершине слева; γ_-^j – множество отрезков, примыкающих к вершине справа.

2. связь между отметками уровня на концах отрезков в узле (условия подхода отрезка к узлу):

$$Z_i = Z_*^j, \quad i \in \gamma^j$$

3. соотношения для сосредоточенных параметров в узле:

$$Q_*^j = f(t, Z_*^j),$$

если задан сосредоточенный приток (отток) в узле;

$$Q_*^j = -\Omega \frac{dZ_*^j}{dt},$$

если задана сосредоточенная ёмкость в узле.

Условия (3) уже учтены в соотношении (1).

В некоторых случаях удобно задавать время в минутах, часах или сутках. С этой целью в программу введён масштаб времени m_t . Таким образом, в случае, если время измеряется в часах, то $m_t = 3600$ и все величины во входной информации, имеющие размерность времени (кроме величины g) всегда следует задавать в часах. Далее каждый отрезок рассматриваемой системы русел разбивается на N_i интервалов, длина которых $\Delta_i = L_i/N_i$ и нумеруются точки разбиения каждого отрезка слева направо натуральными числами последовательно, начиная с 0. Ось времени t также разбивается на равные интервалы длины τ . В результате имеем область определения системы рассматриваемых уравнений, покрытую прямоугольной сеткой с шагом τ (постоянным для всех отрезков) по оси t и с шагом Δ_i (постоянным для каждого отрезка) по оси x .

Гидравлические уравнения записываются в характеристической форме:

$$R \frac{\partial U}{\partial t} + \Lambda R \frac{\partial U}{\partial x} = F$$

$$U = \begin{pmatrix} Q \\ Z \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} 1 & -B(V-C) \\ 1 & -B(V+C) \end{pmatrix}; \quad \Lambda = \begin{pmatrix} V+C & 0 \\ 0 & V-C \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix};$$

$$F_{1,2} = V^2 \left(B \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_{h=const} \right) - g \omega \frac{Q|Q|}{K^2} - q(V \mp C) - \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \xi B W_l |W| - \frac{P_s}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

2.3.7. Алгоритм решения разностных уравнений.

Процесс решения происходит в несколько этапов. На первом вершины и отрезки рассматриваются в порядке возрастания номеров с $i=1$ и $j=1$, что является по сути прямой прогонкой. На этапе обратной прогонки вершины и отрезки рассматриваются наоборот в порядке убывания. В ходе решения обобщённых уравнений Сен-Венана предполагается, что распределения расходов, уровней воды по длине каждого отрезка для момента времени времени $t = t^k$ известны.

1 этап. Прямая прогонка. Решение системы уравнений для момента времени $t = t^k$ ищется в виде (далее индексы i и $k+1$ для простоты записи будут опущены):

$$U_{n,i}^{k+1} = X_{n,i} U_{n+1,i}^{k+1} + Y_{n,i}, \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.8)$$

$$i = 1, 2, \dots, M,$$

где X_n и Y_n – коэффициенты.

2 этап. Обратная прогонка. Вершины и отрезки рассматриваются в обратном порядке.

- а) по известным значениям Q^j и Z^j определяются значения Q_N и Z_N M -го отрезка;
- б) по формуле (2.8) определяются значения Q_n и Z_n для точек $n = N-1, \dots, 0$;
- в) с условий сопряжения вычисляются значения Q_N и Z_N для $(M-1)$ -го отрезка.

Эта процедура повторяется последовательно для всех отрезков. В итоге для момента времени $t = t^k$ будут определены значения $Q(x)$ и $Z(x)$, а, следовательно, и значения средней скорости $V(x)$. Таким образом, для момента времени $t = t^{k+1}$ найдены значения всех неизвестных функций во всех расчётных точках рассматриваемой системы открытых русел, состоящей из M отрезков и $(M+1)$ -ой вершины. Описанный процесс решения гидравлических уравнений повторяется последовательно для всех моментов времени $t_0 \leq t \leq t^k$, где t_0 – момент времени, с которого начинается расчёт, t^k – момент времени, до которого необходимо вести расчёт.

Коэффициенты гидравлических дифференциальных уравнений вычисляются по следующим формулам:

1. Площадь поперечного сечения русла $\omega(x, h)$ – по формуле трапеций:

$$\omega(x, h) = \int_0^h B(x, \varphi) d\varphi = \omega_o + \sum_{r=0}^{l-1} \frac{B_r + B_{r+1}}{2} (\varphi_{r+1} - \varphi_r)$$

2. Модуль расхода $K(x, h)$ для каждого поперечного сечения русла либо известен заранее и задаётся в качестве исходной информации в табличном виде, либо рассчитывается по формуле:

$$K = \omega C \sqrt{R},$$

где
$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad C = \frac{1}{n} R^y.$$

Здесь χ – смоченный периметр (длина смоченной линии для поперечного сечения русла); n – коэффициент шероховатости; y – показатель степени.

$$\chi = B_o + 2 \left(\sum_{r=0}^{l-1} \sqrt{(Z_{r+1} - Z_r)^2 + \frac{1}{2} (B_{r+1} - B_r)^2} + \sqrt{(Z - Z_l)^2 + \frac{1}{2} (B - B_l)^2} \right).$$

3. Коэффициент шероховатости n считается известным и задаётся либо постоянным для поперечного сечения русла, либо постоянным на отрезке русла.

Коэффициент Шези C вычисляется по одной из следующих зависимостей:

– формула Маннинга:
$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}};$$

– формула Агроскина:
$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R.$$

4. Величина заглубления центра тяжести поперечного сечения вычисляется по формуле:

$$h_c = \frac{1}{\omega} \int_0^h (h - \varphi) b(x, \varphi) d\varphi = h - \frac{P_e}{\omega},$$

$$P_{\varepsilon} = \int_0^h \varphi b(x, \varphi) d\varphi = \sum_{r=0}^{l-1} \frac{Z_{r+1} - Z_r}{6} [B_{r+1}(2Z_{r+1} + Z_r) + B_r(2Z_r + Z_{r+1})] + \frac{Z - Z_l}{6} [B(2Z + Z_l) + B_l(2Z_l + Z)]$$

Здесь P_{ε} , B , ω соответствуют глубине реки $h = Z - Z_d$.

Глава 3. Физико-географическое описание объектов.

В качестве объектов моделирования в данной курсовой работе были использованы материалы отчета по реке Ардон и ее притоку реке Баддон, а также ручью Чат-Баш. Ардон (осет. *Æрыдон* — «бешеная река») — река, протекающая на Северном Кавказе в Северной Осетии, левый приток Терека. Длина составляет 102 км, а площадь бассейна насчитывает 2700 км². Образуется путем слияния рек Мамисондон, Нардон, Адайком и Цмиакомдон, берущих свое начало в ледниках Главного Кавказского хребта. Река Ардон протекает по территории Северо-Осетинского заповедника. До выхода на предгорную Осетинскую равнину река течёт по глубокому Алагирскому ущелью.



Рисунок 10. Река Ардон

Река Баддон берет своё начало с северных склонов Кавказского хребта у подножья горы Цмиакомхох с отметкой 4117 м. Она является правым притоком р. Ардон и впадает в него на 58 км от устья напротив верхней части села Мизур. Длина реки Баддон равняется 13 км, площадь водосбора к устью- 42 км². Средняя высота водосбора 2540 м, залесенность — 10%, площадь ледников — 9% [5].



Рисунок 11. Русло р. Баддон на подходе к «Бадским воротам»

Ручей Чат-Баш протекает в Кабардино-Балкарской Республике и впадает в реку Камык-Су в 4,6 км от устья. Длина водотока составляет 3,3 км, а площадь водосбора насчитывает 7,6 км² по данным государственного водного реестра России. Река Камык-Су в свою очередь относится к бассейну реки Баксан, который также входит в водную систему Терека. Далее будут рассматриваться физико-географические особенности формирования стока на территории бассейна реки Терек.

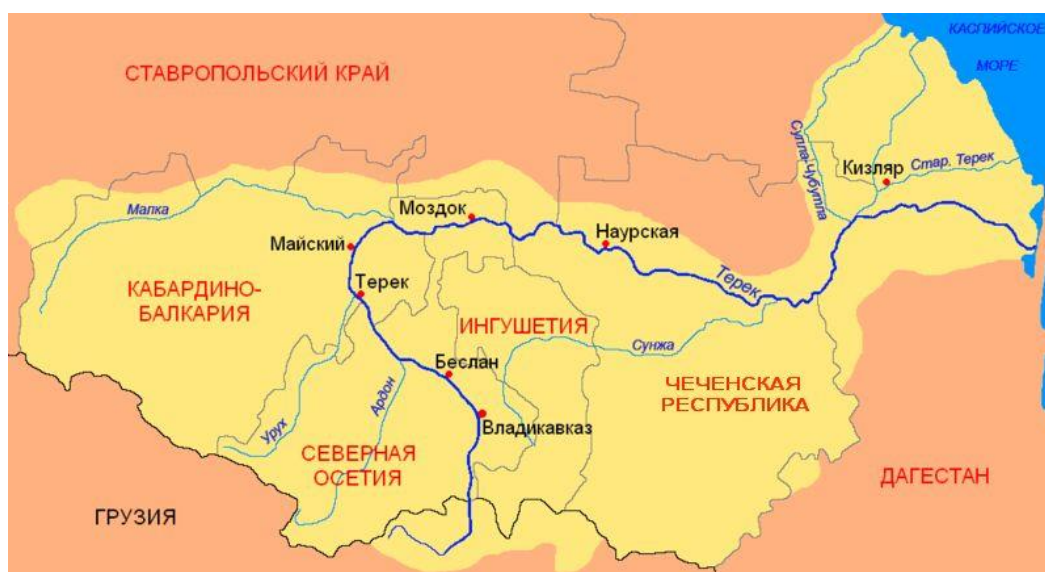


Рисунок 12. Бассейн Терека.

3.1. Рельеф

Южная часть территории, расположенная к югу от реки Терек, представляет собой наклонную к северу аккумулятивную равнину, которую пересекают многочисленные правобережные притоки р. Терек, берущие свое начало на Кавказском хребте. Поверхность этой равнины осложняется двумя параллельными предгорными складчатыми хребтами, простирающимися в широтном направлении к западу от меридиана города Грозного между Терек и Сунжей, сложенными породами палеогенового и неогенового возраста: северным Терским с абсолютными высотами до 703 м и южными, отделенным от последнего Алханчуртовской долиной, Сунженским высотой 926 м. У подножия Большого Кавказа к югу от Сунженского хребта расположены Осетинская и Чеченская наклонные равнины, высотой 300-700 м, по которым протекают реки Терек, Сунжа и Ардон, а к западу-Кабардинская наклонная равнина с высотами 200-500 м, дренируемая Малкой, Баксаном, Черексом. Равнины сложены флювиогляциальными и аллювиальными четвертичными отложениями [5].



Рисунок 13. Рельеф бассейна реки Терек.

В нижнем течении Терек протекает на Терско-Кумская низменности, являющейся южной частью обширной Прикаспийской низменности. Поверхность низменности плоская с высотами от -28 до 100-150 м, полого

наклонена к востоку, ее большая часть расположена ниже 100 м, а восточная часть ниже уровня океана. На территории Северного Кавказа довольно широкое распространение получили карстовые явления. Н. А. Гвоздецким было выделено 6 больших областей и 2 карстовых района, представленных на рисунке ниже [5].

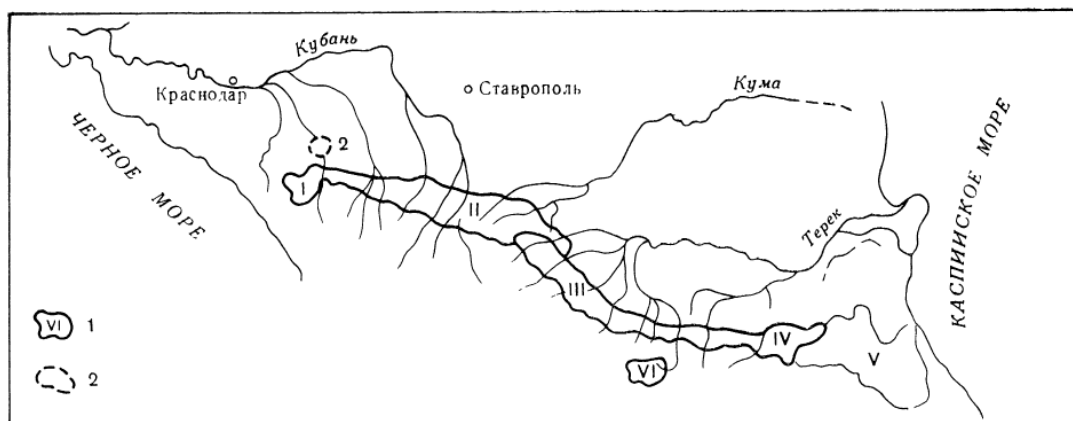


Рисунок 14. Схематическая карта карстовых областей Северного Кавказа. 1-граница областей, 2-граница районов [5].

Бассейны рек Ардон и Камык-Су относятся к III району – в восточную часть полосы куэст.

3.2. Климат

Одним из основных факторов, влияющих на климат Северного Кавказа, является циркуляция атмосферы. Проникающий сюда арктический воздух заменяется морскими воздушными массами, холодные вторжения из Казахстана-выносами тропического воздуха из Средиземного моря и Ирана. Также большое влияние на формирование климата оказывает наличие двух незамерзающих морей. На территории Северного Кавказа Темниковой Н.С. было выделено 5 климатических областей. В данном случае нас интересует Предкавказская восточная климатическая область, которая располагается на равнинах и предгорьях до высоты 1 км на территории Ставропольского края, Кабардино-Балкарской и Северо-Осетинской республик. Климат данной области считается достаточно разнообразным: от жаркого и засушливого на

равнинах к более прохладному и влажному в предгорьях. Первые заморозки в предгорьях появляются в первой половине октября, на равнине же - во второй. В течение зимнего периода часто выпадают морозящие дожди. Средняя январская температура в предгорьях составляет $-4, -5^{\circ}\text{C}$. Весной окончание заморозков приходится на равнине на середину, а в предгорьях на вторую половину апреля. Примерно в это же время температура воздуха переходит через 10°C . Летом же она поднимается на равнинах до $23-24^{\circ}\text{C}$. Для предгорных территорий средняя температура воздуха в июле составляет $18-22^{\circ}\text{C}$, с подъемом на каждые 100 м выше она понижается на $0,5^{\circ}\text{C}$ [5].

Что касается осадков, то на равнинных территориях, которые относятся к полузасушливой зоне, количество осадков составляет 200-320 мм, стоит отметить, что все выпавшие осадки испаряются. К зоне неустойчивого увлажнения относятся территории Ставропольского плато и склоны предгорий Большого Кавказа до высоты 500-600м. Сумма осадков здесь составляет 300-600мм с постепенным увеличением при подъеме в горы.



Рисунок 15. Годовые суммы осадков, мм [5].

Повторяемость гроз меньше, чем в западном Предкавказье, в восточных районах грозы бывают 15-20 раз в году, на Ставропольском плато-20-25, в предгорьях она увеличивается до 25-30.

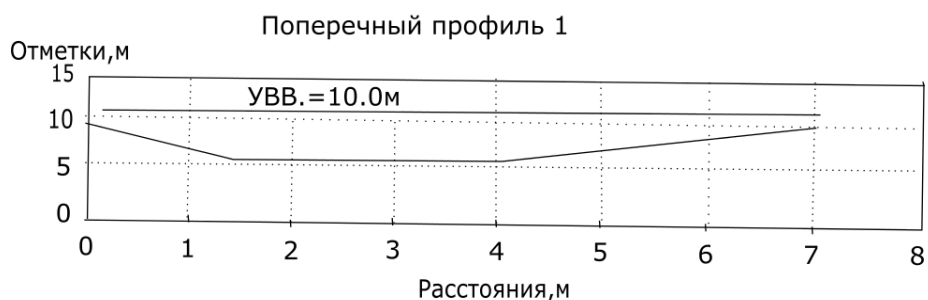
3.3. Почвы и растительность.

На территории Северного Кавказа зарегистрировано около 40 типов почв. Основными считаются черноземы, каштановые почвы, бурые, пустынно-степные, горло-лесные почвы, горно-луговые, которые в свою очередь подразделяются на подтипы и виды почв в зависимости от мощности гумусовых горизонтов, характера почвообразующих пород, степени выраженности почвообразовательных процессов и условий залегания по элементам рельефа. Также на Северном Кавказе встречаются лугово-черноземные, лугово-каштановые, луговые, аллювиально-луговые, лугово-болотные, болотные, солончаки и солонцы. На равнинных территориях при движении с запада на восток наблюдается закономерная смена в меридиональном направлении типов почв: черноземы сменяются каштановыми, которые в свою очередь в Прикаспийской низменности переходят в бурые пустынно-степные почвы. Также происходит уменьшение мощности гумусового горизонта, возрастает засоление и снижается плодородие почв. Наибольшее распространение имеют черноземы и каштановые почвы, также горно-лесные и горно-луговые, которые оказывают большое влияние на процессы формирования стока рек данной территории.

Большое влияние на характер растительного покрова оказывает человеческая деятельность, такая как вырубка лесов, распашка склонов и выпас скота. Очень часто это приводит к тому, что образуются вторичные луга и степи. Основными типами растительности являются: степная, полупустынная и пустынная, лесостепная, лесная и высокогорная. Низменные части Северного Кавказа заняты степной и полупустынной растительностью, на предгорьях и склонах наблюдаются лесостепи и леса, в высокогорьях-субальпийская и альпийская растительность.

3.4. Селевые потоки в русле ручья Чат-Баш

По ручью Чат-Баш селевые потоки проходили достаточно часто, было отмечено как минимум 3 участка со следами развития сдвигового селевого процесса, который далее трансформировался в транспортно-сдвиговый процесс. Следы прохождения селей по данному ручью встречаются повсеместно, как в виде древних селевых валов, поросших ивняком и березой, так и результаты недавно прошедших. Последний сформировавшийся сель прошел 14.06.2005 года. По результатам проекта по защите г. Тырнауза КБР от затопления р. Баксан в условиях селевой опасности р. Камык-Су под руководством Э.В. Запорожченко и А.М. Падмя было установлено, что импульсом формирования стал сдвиг с левого борта селевого вреза, объем сдвига был не более 10 тыс. км³. По ходу движения сель развивался по типу транспортно-сдвигового селевого процесса, вовлекая рыхлообломочный материал из очага и русла. На выходе из очага максимальный расход селя составил 80 м³/с. До слияния с рекой Тырнауз расход мало изменился и равнялся 70 м³/с [6]. Ниже слияния с рекой Тырнауз сель отложился на участке 500-600 м в виде отдельных селевых террас и валов. Данный сель был грязекаменным, о чем свидетельствуют оставленные им следы – грязевые примазки на бортах, селевые валы.



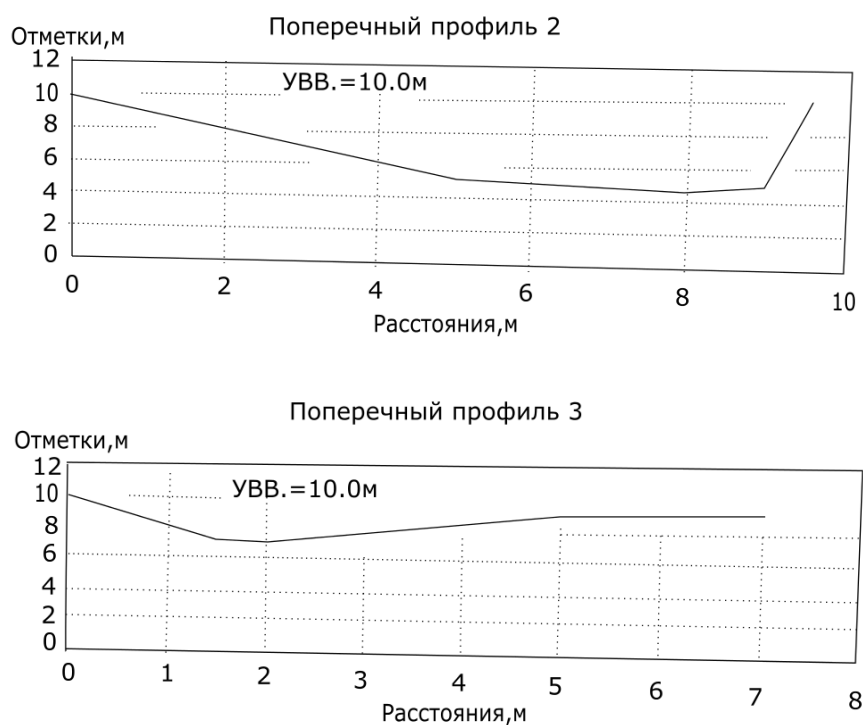


Рисунок 16. Поперечные профили руч. Чат-Баш от 14.06.2005 [6].

Обследование показало, что в бассейне ручья Чат-Баш имеется мощный селевой очаг с достаточным запасом рыхлообломочного материала, что может стать причиной для схода селей в ближайшем будущем. На сход селевых потоков значительное влияние оказывают ливневые осадки, а в бассейне ручья Чат-Баш также имеет большое значение снегонакопление на водосборе очага. [6].

3.5. Селевые потоки в русле реки Баддон.

В бассейне реки Баддон располагается несколько селевых очагов в 3-4 км от истока реки. Проходящие селевые потоки оказываются катастрофическими для поселка Мизур в устьевой области реки Баддон. Механизм образования селевых потоков следующий: грязекаменные сели формировались на левых бортах реки Баддон под действием транспортно-сдвигового процесса, затем происходил их распад в русле Баддона и дальнейшее вовлечение этого материала наносоводными селями, которые уже попадали в русло Ардона.

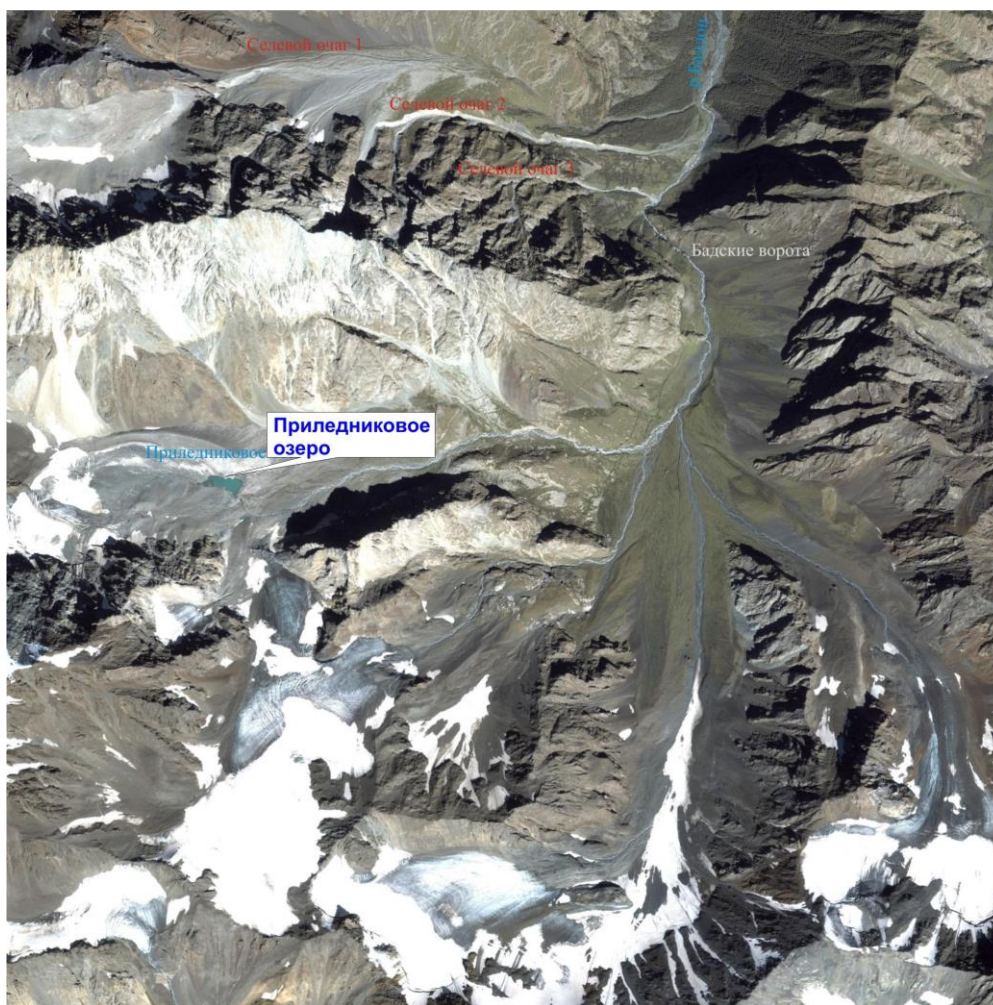


Рисунок 17. Фрагмент космического снимка верхний р. Баддон.

В результате обследования октябрь-ноябрь 2012 года по материалам «Инженерно-гидрологического изыскания по р. Баддон и моделирование прохождения наносоводных паводков на сопряжении рек Баддон-Ардон для разработки рабочей документации по объекту: Защита территории в долине р. Баддон (Зарамагская ГЭС-1)» под руководством О.В. Скупирнюка и А.С.Никулина на подходе к «Бадским воротам» в русле реки не было выявлено следов прохождения селевых потоков высокой плотности. Также был сделан вывод, что прорыв или внезапное опорожнение озера, расположенного на рисунке ниже, в ближайшем будущем не прогнозируется.



Рисунок 18. Моренное озеро бассейна р. Баддон

Кроме того, считается, что грязекаменные селевые потоки не смогут преодолеть естественный каньон («Бадские ворота»). В ходе изысканий было установлено, что селеопасными являются левобережные притоки, впадающие в реку Баддон на 10 км от устья. Там было выявлено 3 селевых вреза разного возраста (Рисунок 19) [7].

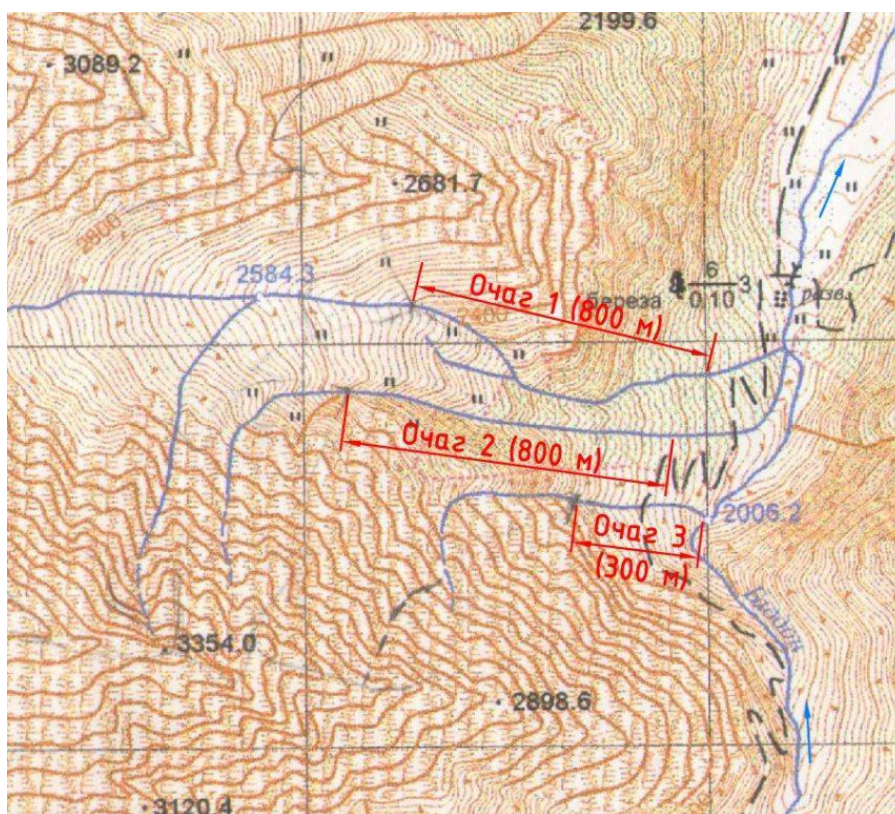


Рисунок 19. Схема расположения селевых очагов в верховьях р. Баддон [7].

Глава 4. Результаты моделирования

4.1. Моделирование неустановившегося движения воды для участка реки Ардон

Расчет проводился для уточнения гидролого-морфометрических характеристик паводка на участке реки Ардон и ее притока реки Баддон на основе предоставленных данных о прошедшем паводке в 2014 году.

Полученная информация в дальнейшем будет использоваться для защиты поселка Мизур от наводнения, который расположен на берегу реки Ардон.



Рисунок 20. Вид на поселок Мизур.

Расчеты выполнялись на модели неустановившегося течения, по программе, разработанной Виноградовой Т.А. Для этого имеющийся участок реки Ардон разбивался на 5 расчетных с учетом морфометрических особенностей (рисунок 21).

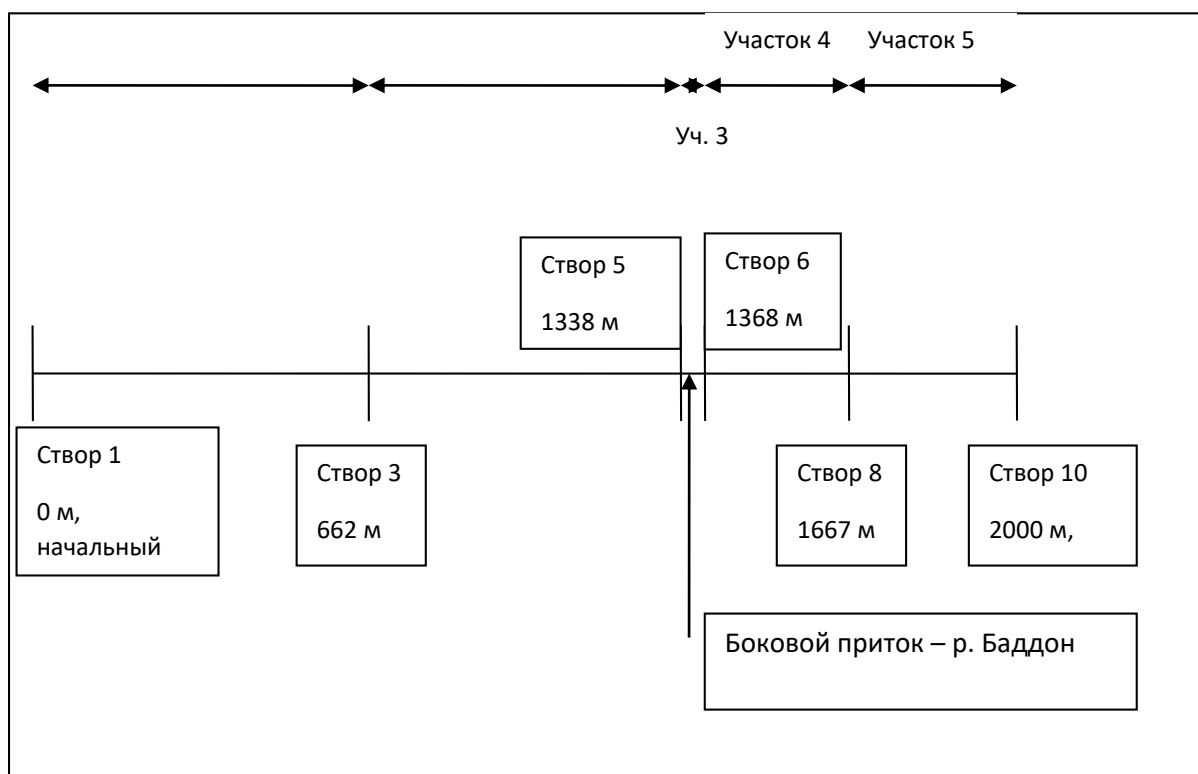


Рисунок 21. Схематизация модели неустановившегося движения воды для участка р. Ардон

В качестве исходной информации для каждого створа задавались значения расходов воды, координат графика зависимости ширины русла от средней глубины, начальные расходы воды, начальные уровни воды, уровни воды, отметки дна. Для створа № 5 проводилось задание гидрографа реки Баддон в качестве граничного условия.

Продолжительность расчета составила 360 часов. В качестве исходных данных принимался средние суточные расходы воды по данным. Входной гидрограф стока задавался таким образом, чтобы максимальный расход воды р. Ардон приходился на 312-й расчетный час. Принятый расчетный шаг по времени равнялся 0,2 часам (12 минутам, 720 с). Принятым расчетным шагом по пространству считался 30 интервалов на участке (таблица 6).

Таблица 6. Характеристики расчетных участков р. Ардон

№ участка	1	2	3	4	5
Длина участка, м	682	656	30	299	333
Кол-во интервалов	30	30	30	30	30
Протяженность расчетного интервала, м	22,73	21,87	1	9,97	11,1

В процессе расчетов были рассмотрены следующие варианты, представленные в таблице ниже.

Таблица 7. Варианты, принятые в модели.

№ варианта	Р. Ардон	Р. Баддон
1	0,5%	0,5% ливневый паводок
2	1%	1% ливневый паводок
3	10%	10% ливневый паводок
4	0,5%	0,5% наносоводный сель
5	1%	1% наносоводный сель

По каждому варианту для каждого расчетного створа были получены:

1. Гидрографы стока
2. Отметки уровней воды по расчетным створам
3. Средняя скорость течения, м/с
4. Площадь поперечного сечения, м
5. Ширина, м
6. Модуль расхода
7. Число Рейнольдса
8. Число Фруда

В таблицах ниже приведены расчетные величины максимальных расходов воды для рассмотренных вариантов прохождения паводка на р. Ардон.

Таблица 8. Максимальные расходы для варианта 1.

№ створа	Время наступления, часы с начала расчета	Q _{max} , м ³ /с
6	312	324.4
8	312	323.9
10	312	322.8

Таблица 9. Максимальные расходы для варианта 2.

№ створа	Время наступления, часы с начала расчета	Q _{max} , м ³ /с
6	312	324.5
8	312	324.1
10	312	323.4

Таблица 10. Максимальные расходы для варианта 3.

№ створа	Время наступления, часы с начала расчета	Q _{max} , м ³ /с
6	312	324.5
8	312	324.1
10	312	323.4

Таблица 11. Максимальные расходы для варианта 4.

№ створа	Время наступления, часы с начала расчета	Q _{max} , м ³ /с
6	312	329.5
8	312	329.0
10	312	328.1

Таблица 12. Максимальные расходы для варианта 5.

№ створа	Время наступления, часы с начала расчета	Qmax, м³/с
6	312	324.5
8	312	323.9
10	312	322.8

Из приведенных расчетов следует, что в период паводка на р. Ардон после впадения в него р.Баддон происходит резкое увеличение расходов воды и формируется волна, которая при условии занесения русла селевыми отложениями может проходить в виде волны прорывного паводка. В качестве примера приведены графики $v=f(t)$, $Q=f(t)$ и также поперечники 6, 8 створа для 5 варианта расчета. Необходимо отметить, в результате расчетов на №8 створе максимальная площадь поперечного сечения была получена по 5 варианту и равнялась 120,05 м², а для створа № 6-115,55 м², в то время как затопление территории происходит уже при площади поперечного сечения равной 110 м². Также при расчете 1, 2 и 3 вариантов затопление территории происходит только на 8 участке.

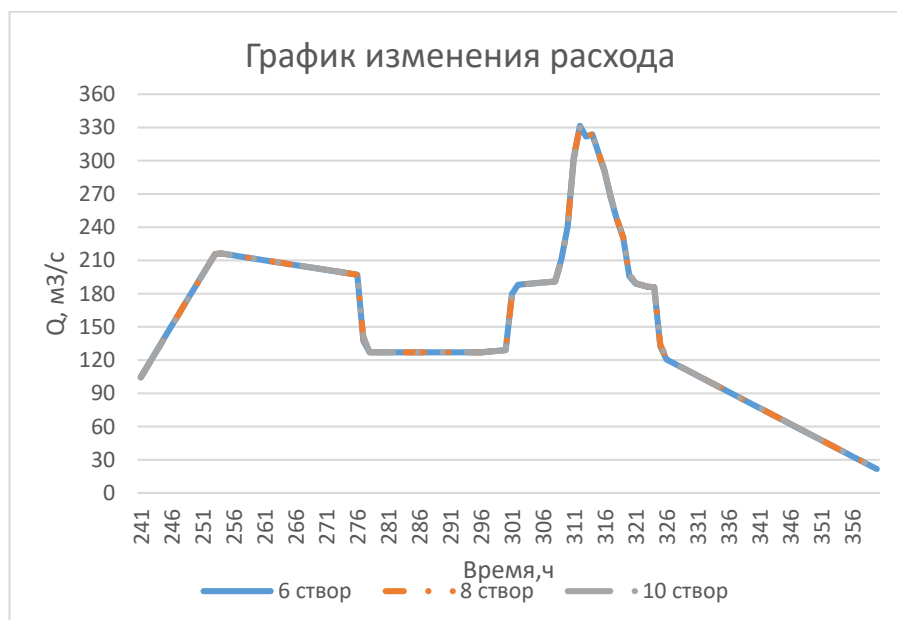


Рисунок 22. Совмещенный гидрограф трех створов для 5 варианта.

Скорости представлены для 5 участка до впадения реки Баддон, и для 10, который являлся замыкающим в данных расчетах.

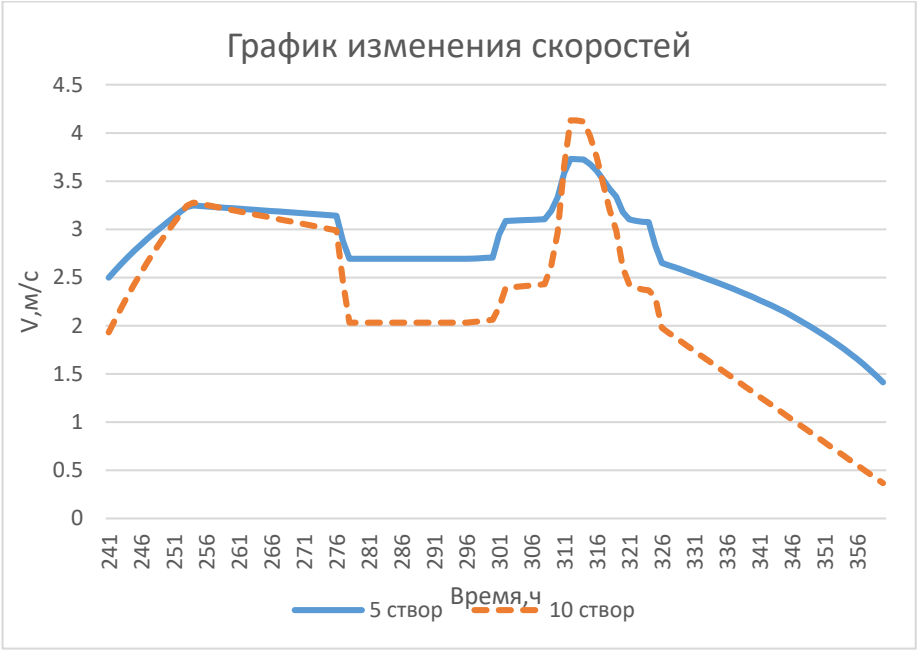


Рисунок 23. Совмещенный график изменения скоростей на двух створах для 5 варианта.

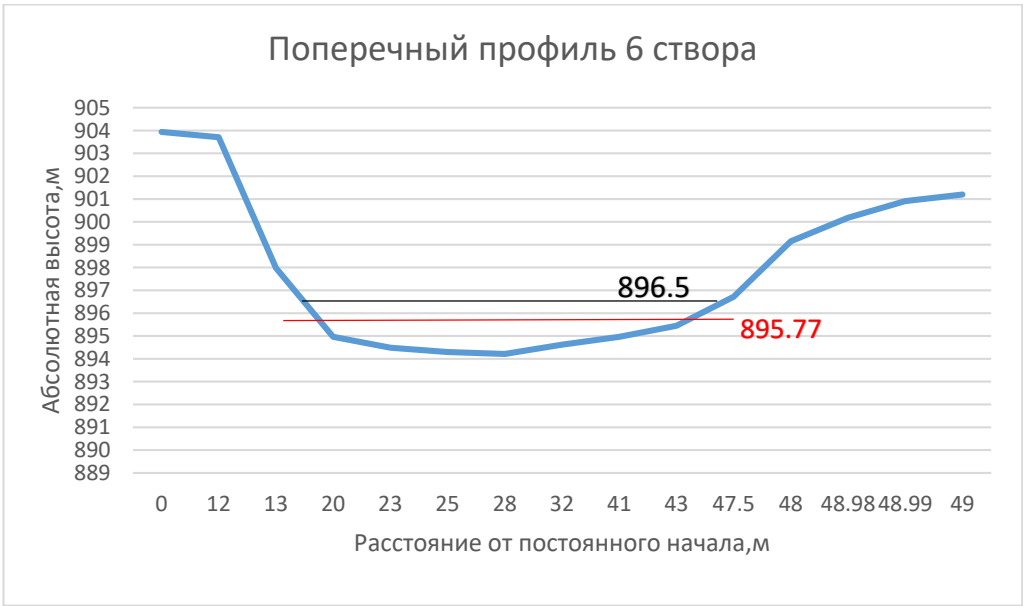


Рисунок 24. Поперечное сечение створа №6 (Вариант 5).

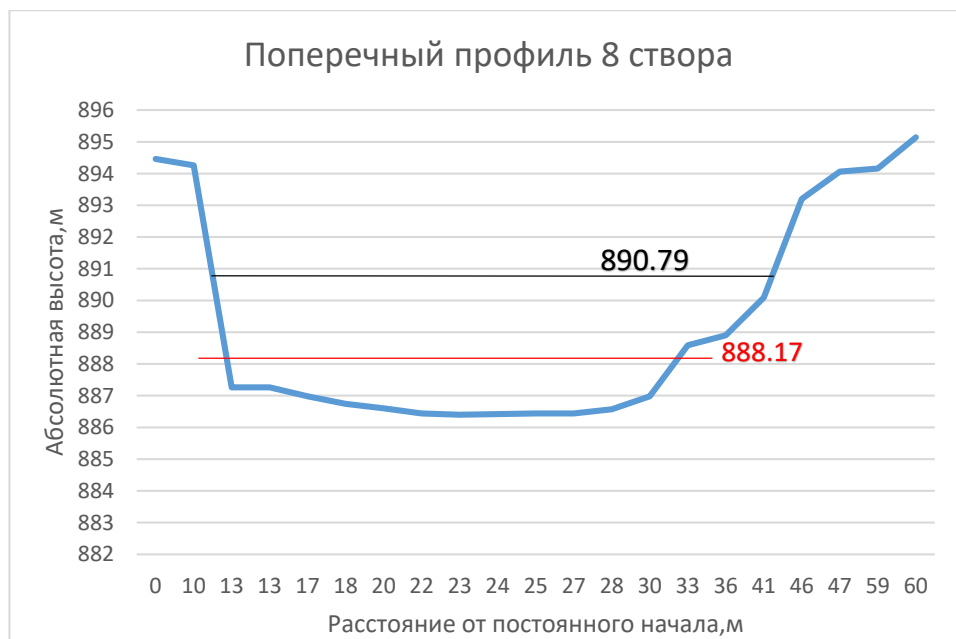


Рисунок 25. Поперечное сечение створа №8 (Вариант 5).

Благодаря модели расчета неустановившегося движения воды можно узнать в какое время паводочная волна достигнет своего максимума и его величину на определенном участке реки.

4.2. Расчет скоростей движения наносоводного селевого потока по формулам В.В. Голубцова и И.И. Херхеулидзе.

Также был проведен расчет скорости и расхода селевого потока на Баддоне с использованием формул, представленных в Руководстве селестоковым станциям и гидрографическим партиями.

1. Расчет средней скорости наносоводного селя в метрах в секунду производится по формуле В.В.Голубцова

$$\bar{v} = 4,5 \bar{h}^{0,67} i^{0,17}, \quad (4.1.)$$

где \bar{h} - средняя глубина потока, м;

i - продольный уклон русла на участке

2. Если селевая смесь не обладает вязкопластическими свойствами, то расчет скорости движения потока с достаточной для практики

точностью может быть произведен по известной формуле И.И. Херхеулидзе [12]:

$$\bar{v}_c = 4,83 h^{0,5} (\sin \alpha)^{0,25}, \quad (4.2)$$

Где $\sin \alpha$ - угол наклона селевого очага.

Таблица 13. Исходные данные для устьевой части Баддона за 2012 год.

р. Баддон, устьевая часть	Глубина, м	Уклон	w, м ²
1 профиль	2.66	0.087	35.7
2 профиль	3	0.087	36.8
3 профиль	3.74	0.087	38.9

Таблица 14. Результаты расчета скоростей и максимального расхода селевого потока по данным 2012 года.

р. Баддон, устьевая часть	По И.И. Херхеулидзе		По В.В. Голубцов	
	V, м/с	Q, м ³ /с	V, м/с	Q, м ³ /с
1 профиль	4.3	152.7	5.7	204.3
2 профиль	4.5	166.1	6.1	226.2
3 профиль	5.1	197.3	7.2	279.7
Среднее	4.6	172.1	6.4	236.7

В связи с тем, что в обеих формулах используется лишь такие величины, как глубина потока и уклон, результаты существенно различаются. Так по первому профилю, используя формулу И. И. Херхеулидзе, величина скорости равняет 4,3 м/с, в то время, как, считая по выражению В. В. Голубцова, получаем 5,7 м/с. Значения расходов также значительно отличаются.

Таблица 15. Сводная таблица результатов.

	Скорость, м/с	Расход максимальный, м ³ /с
По И.И.Херхеулидзе	4.6	197.3
По В.В.Голубцову	6.4	279.2
По модели расчета неустановившегося движения воды	3.9	147.6

4.3. Моделирование неустановившегося движения воды для участка реки Ардон с изменением коэффициента шероховатости.

Как уже было сказано выше, возникают определенные трудности при задании коэффициента шероховатости, так как это функционально зависимый параметр, вычислить который возможно только обратным путем. Коэффициент шероховатости изменяется в пределах от 0,06 до 0,095. В нашем случае изначально коэффициент шероховатости задавался равным 0,08 для всех вариантов. Далее для 5 варианта производился расчет при изменении данного коэффициента. Необходимо отметить, что минимальным значением коэффициента шероховатости при котором модель могла производить расчеты оказалось 0,075, максимальным же - 0,095. Расчет проводился с устойчивым значением коэффициента шероховатости для всего участка, а также с постепенным его увеличением от 0,07 до 0,09. Ниже представлены значения скоростей на 5 и на 6 створах, то есть на реке Ардон до впадения притока и соответственно после.

Таблица 16. Результаты расчетов при изменении коэффициента шероховатости.

	Скорость на 5 створе, м/с	Скорость на 6 створе, м/с
при $n=0,075$	3.9	3.0
при $n=0,08$	3.7	2.8
при $n=0,085$	3.5	2.7
при $n=0,09$	3.4	2.6
при $n=0,095$	3.2	2.5
при $n=0,07-0,09$	3.7	2.7

Таким образом, наибольшие значения скоростей наблюдаются при наименьшем значении шероховатости. Также было получено изменение уровня на 6 створе (после впадения реки Баддон) для всего периода, что представлено на рисунке ниже.

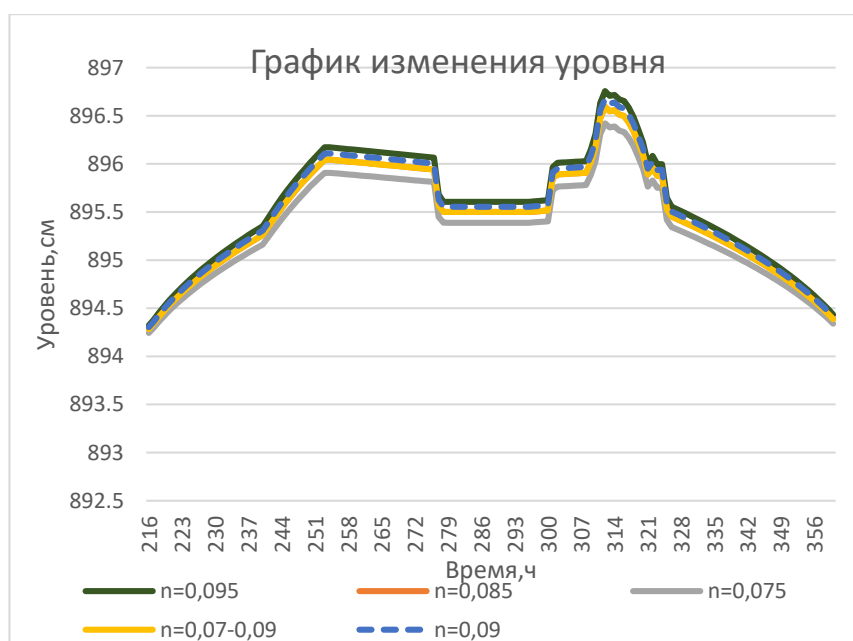


Рисунок 26. Совмещенный график изменения уровня на 6 участке при разных значениях коэффициента шероховатости.

Как можно видеть максимальное поднятие уровня происходит при значении $n = 0,095$, а наименьшее при $0,075$. Кроме того, было получено изменения поперечного сечения на всех створах, но наибольший интерес представляют 6 створ, после впадения Баддона, и 8, в непосредственной близости от которого расположен поселок Мизур.

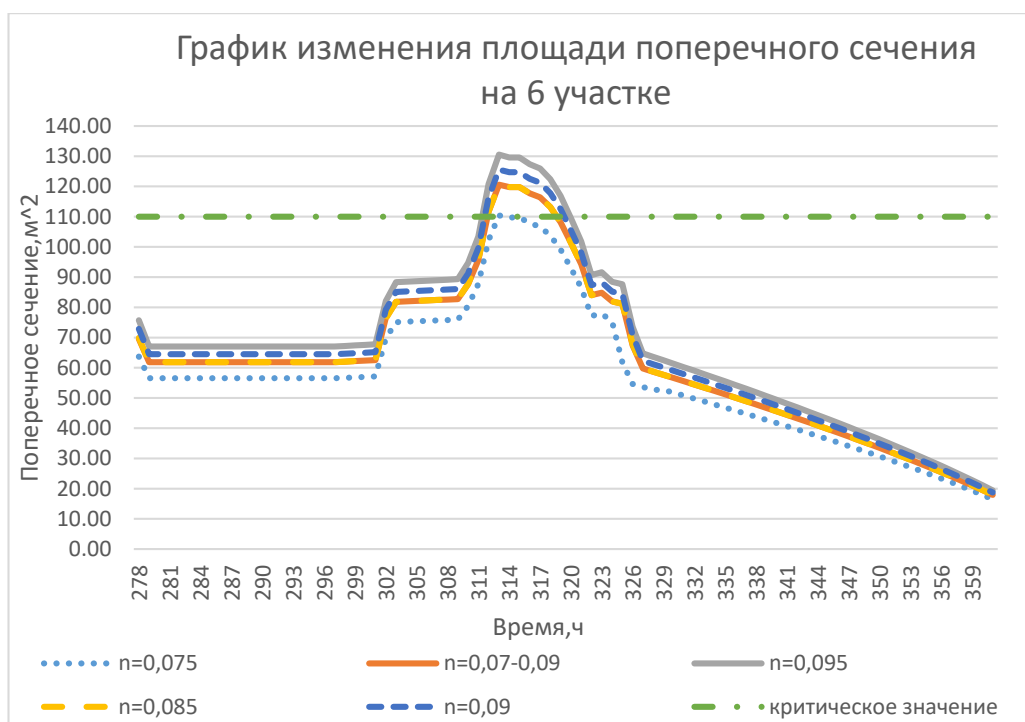


Рисунок 27. Совмещенный график изменения площадей поперечного сечения на 6 створе при разных значениях коэффициента шероховатости.

Максимальная площадь поперечного сечения равна 130,51 м² при коэффициенте шероховатости, заданном 0,095, в то время как затопление территории происходит уже при площади поперечного сечения 110 м².

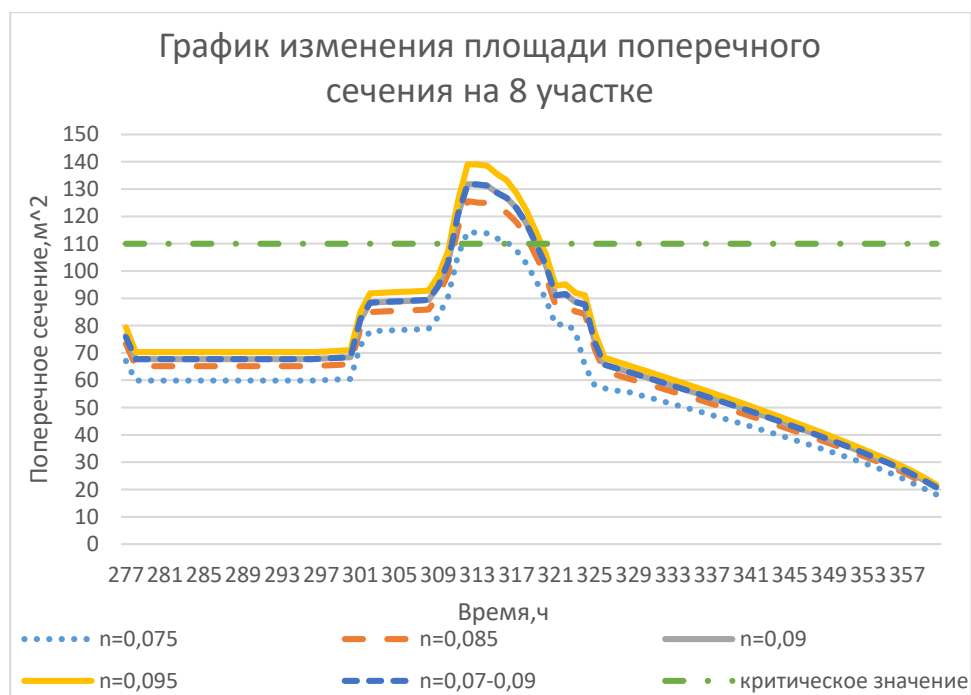


Рисунок 28. Совмещенный график изменения площадей поперечного сечения на 8 створе при разных значениях коэффициента шероховатости.

На 8 же створе максимальное значение площади поперечного сечения составляет 139,05 м² при заданном коэффициенте шероховатости 0,095.

4.4. Моделирование неустановившегося движения воды на руч. Чат-Баш

Расчет проводился для селевого потока, прошедшего в русле ручья Чат-Баш от 14.06.2005. По имеющейся информации из проекта по защите г. Тырнауза КБР от затопления р. Баксан в условиях селевой опасности р. Камык-Су под руководством Э.В. Запорожченко и А.М. Падмя была построена расчетная схема (рисунок 29).

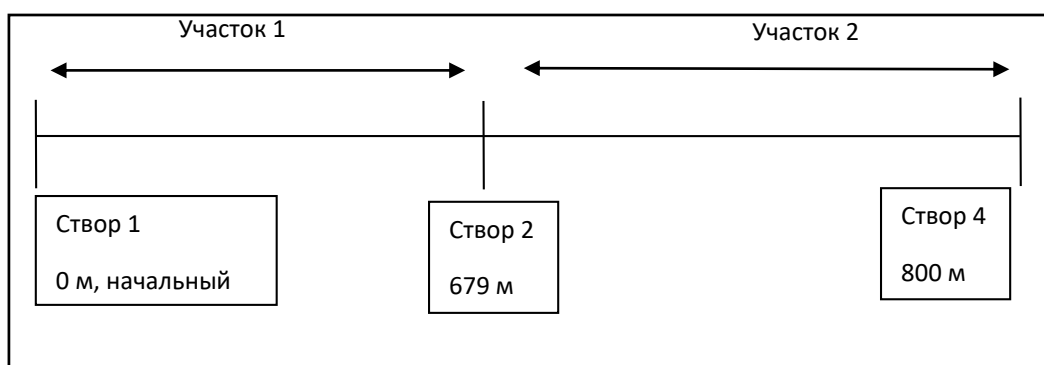


Рисунок 29. Схематизация модели неустановившегося движения воды для руч. Чат-Баш

Селевой поток от 14.06.2005 года развивался по типу транспортно-сдвигового селевого процесса, вовлекая рыхлообломочный материал из очага и русла. Несмотря на то, что по следам селя было установлено, что это был грязекаменный поток, его плотность составила 1685 кг/м³, в то время как для наносоводного селя р. Баддон это цифра равнялась 1380 кг/м³. Таким образом, расчет селевого потока р. Чат-Баш от 14.06.2005 года производился на модели неустановившегося движения воды.

В качестве исходной информации для каждого створа задавались значения расходов воды, координат графика зависимости ширины русла от средней глубины, начальные расходы воды, начальные уровни воды, уровни воды, отметки дна.

Продолжительность расчета составила 12 часов. Принятый расчетный шаг по времени равнялся 900 секунд или же 15 минут. Принятым расчетным шагом по пространству считалось 20 интервалов на участке (таблица 17)

Таблица 17. Характеристики расчетных участков руч. Чат-Баш

№ участка	1	2
Длина участка, м	679	800
Кол-во интервалов	20	20
Протяженность расчетного интервала, м	33,95	40

В результате расчета были получены следующие характеристики:

1. Гидрографы стока
2. Отметки уровней воды по расчетным створам
3. Средняя скорость течения, м/с
4. Площадь поперечного сечения, м
5. Ширина, м
6. Модуль расхода
7. Число Рейнольдса
8. Число Фруда

Подтопление отвалов горно-обогатительного комбината г. Тырныауз начиналось при расходах в $167 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальный расход, полученный по модели, составил $175,8 \text{ м}^3/\text{с}$, в то время как величина наибольшей скорости равнялась $4,1 \text{ м/с}$. Время наступление обоих максимумов совпадало и составило 375 минут с начало отсчета. Ниже приведены графики изменения основных характеристик селя, таких как уровень, расход и скорость.

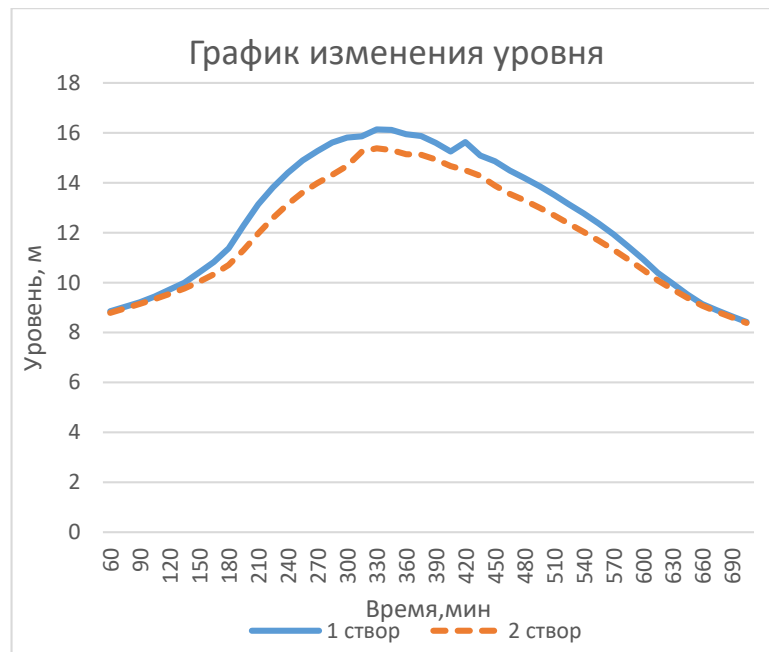


Рисунок 30. Совмещенный график изменения уровня на двух створах.



Рисунок 31. График изменения расхода на 4 створе.



Рисунок 32. График изменения скорости на 4 створе.

Таким образом, в ходе моделирования данного селевого потока было установлено время наступления паводочной волны, ее максимальная скорость и величина на последнем створе.

4.5. Расчет скоростей движения наносоводного селевого потока по формулам В.В. Голубцова и И.И. Херхеулидзе.

Помимо полученных данных по модели был также произведен расчет скорости селевого потока с использованием формул И.И. Херхеулидзе (4.2) и В.В. Голубцова (4.1). Исходными данными для этих формул служат значения средней глубины и уклона, которые для ручья Чат-Баш приведены в таблице ниже.

Таблица 18. Исходные данные для ручья Чат-Баш для 2005 года.

ручей Чат-Баш	Глубина, м	Уклон	$w, м^2$
1 профиль	2.44	0.15	17.1
2 профиль	2.48	0.15	24.5
3 профиль	1.59	0.15	11.1

Таблица 19. Результаты расчета скоростей и максимального расхода селевого потока по данным 2005 года.

ручей Чат-Баш	По И.И. Херхеулидзе		По В.В. Голубцов	
	V, м/с	Q, м ³ /с	V, м/с	Q, м ³ /с
1 профиль	4.7	80.3	5.9	101.3
2 профиль	4.7	116.0	6.0	146.8
3 профиль	3.8	42.1	4.4	49.4
Среднее	4.4	79.4	5.5	99.1

Как уже было сказано ранее результаты, полученные по 2 формулам, существенно различаются. Максимальное значение скорости по формуле И.И. Херхеулидзе составляет 4,7 м/с, в то время, как с использованием выражения В.В. Голубцова эта цифра равняется 6 м/с. Полученные расходы также значительно отличаются.

Таблица 20. Сводная таблица результатов.

	Скорость, м/с	Расход максимальный, м ³ /с
По И.И.Херхеулидзе	4.4	116
По В.В.Голубцову	5.5	146.8
По модели расчета неустановившегося движения воды	4.1	175.8

4.6. Моделирование неустановившегося движения воды для участка ручья Чат-Баш с изменением коэффициента шероховатости.

Как уже было сказано выше, существуют определенные трудности с определением коэффициента шероховатости. Даже при наличии натуральных данных о строении границ русла, характера берегов, наличии растительности, извилистости русла, учет всех этих параметров приводит к

тому, что коэффициент n становится неопределенный. Вследствие чего его снимают либо с кривой расходов при наличии таковой информации или же заменяют коэффициентом Шези. В первичных расчетах для ручья Чат-Баш коэффициент шероховатости задавался постоянным и равнялся 0,075. Далее было проведено моделирование селевого потока с изменением n от 0,08 до 0,095. В таблице ниже можно увидеть, как менялась максимальная скорость в зависимости от n .

Таблица 21. Результаты расчетов при изменении коэффициента шероховатости.

	Скорость на 5 створе, м/с	Расход на 4 створе, м ³ /с
при $n=0,075$	4.14	175.8
при $n=0,08$	4.17	185.3
при $n=0,085$	4.20	184.6
при $n=0,09$	4.18	185.9
при $n=0,095$	4.17	185.4

Наибольшее значение скорости (4.20 м/с) наблюдается при коэффициенте шероховатости 0,085, в то время максимальный расход (185.9 м³/с) при $n=0,09$. Таким образом, подтопление отвалов горно-обогатительного комбината г. Тырныауз происходит при любом значении коэффициента шероховатости. Также были построены графики изменения уровня на 1 и 2 створах при разных значениях n .

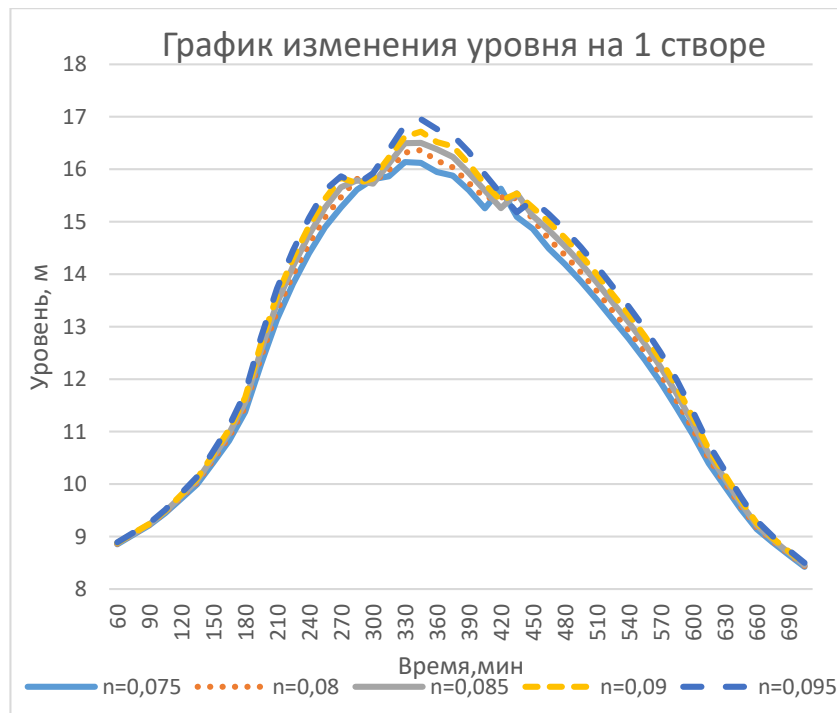


Рисунок 33. Совмещенный график изменения уровня на 1 участке при разных значениях коэффициента шероховатости.

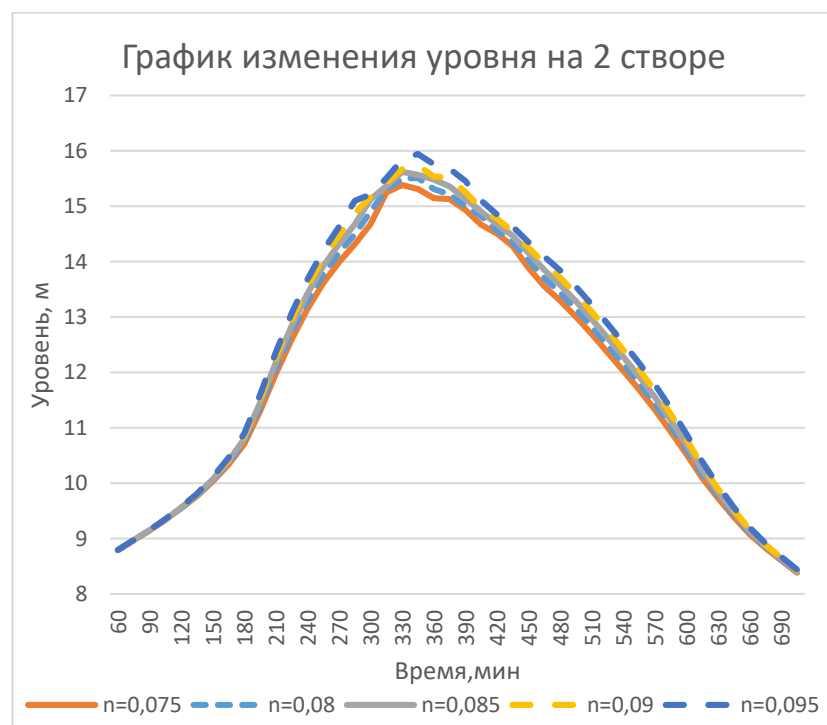


Рисунок 34. Совмещенный график изменения уровня на 2 участке при разных значениях коэффициента шероховатости.

Соответственно наибольшее значения уровня, как на первом, так и на втором участках наблюдается при коэффициенте шероховатости, равном 0,095.

Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены основные типы селевых потоков и соответствующие им процессы формирования, такие как сдвиговый и транспортно-сдвиговый. Также был проведен анализ существующих методов исследования селевых потоков, к ним относятся уникальный Чемолганский эксперимент, проведенный в 1972-1978 годах (под руководством Ю. Б. Виноградова). Мною рассмотрена транспортно-сдвиговая модель формирования селей, разработанная Виноградовым Ю. Б., которая ориентирована на потоки высокой плотности. Также анализировалось влияние различных факторов на величину расхода, например, воздействие угла наклона на величину критического расхода, расход селевого потока в зависимости от уклона и влажности ПСМ, изменение расхода селевого потока в зависимости от расхода воды и длины участка. Рассчитанная по модели функция приращения твёрдого материала по длине тальвега при малом увлажнении ПСМ была подтверждена данными по Чемолганскому эксперименту.

Расчет наносоводных селевых потоков проводился на 2 объектах с использованием модели неустановившегося движения воды, а именно на участке р. Ардон и для руч. Чат-Баш. Моделирование р. Ардон проводилось по данным 2014 года по заданию ОАО «Севкавгипроводхозом» в целях защиты территории в долине р. Баддон для строящейся Зарамагской ГЭС-1. Расчет по гидродинамической модели увязывает данные расходов, уровней и гидравлических характеристик на всем протяжении прохождения селевого потока, и в заданных нескольких сценариях, исходные данные были уточнены, так как число Фруда, которое отражает меру кинетичности, было превышено. Моделирование производилось для 5 вариантов расчета ливневых паводков и наносоводных селей различной обеспеченности с изменением коэффициента шероховатости (от 0,075 до 0,095). В ходе расчетов были получены значения скоростей и расходов воды, когда

начинается подтопление территории. Кроме того, проводилось сравнение результатов, полученных по модели с аналитическими формулам И. И. Херхеулидзе и В.В. Голубцова. Так как данные формулы учитывают лишь глубину и уклон потока, полученные значения скоростей селевого потока существенно различались.

На ручье Чат-Баш расчеты проводились по заданию ОАО «Севкавгипроводхозом» для защиты города Тырныауз. Также была проведена увязка гидравлично- морфометрических характеристик, расходов, уровней. В результате были получены значения основных характеристик селя, таких как скорость, уровень и расход. Производились эксперименты с изменением коэффициента шероховатости (0,075-0,095). Подтопление отвалов горно-обогатительного комбината г. Тырныауз начиналось при расходе в $167 \text{ м}^3/\text{с}$, по расчетам модели минимальный расход составил $175,8 \text{ м}^3/\text{с}$ при $n=0,075$, наибольший расход получился $185,9 \text{ м}^3/\text{с}$ при $n=0,09$. Амплитуда колебания скорости, полученной по аналитическим формулам и по модели на ручье Чат-Баш составила 1,4. Несмотря на то, что модель неустановившегося движения воды не учитывает гранулометрический состав и плотность селевого потока она является увязанной системой. Что приводит нас к существующим проблемам в селеведении, а именно недостаточное количество гидрологических постов и селевых станций.

Таким образом, в ходе данной работы был широко рассмотрен транспортно-сдвиговый процесс формирования селя, проанализированы методы его расчета, а также промоделированы селевые потоки, возникающие под действием данного процесса в различных условиях формирования.

Список литературы

1. Виноградова Т.А., Виноградов Ю.Б. «Опасные гидрологические явления».
2. Виноградова Т.А., Виноградов Ю.Б. «Моделирование опасных гидрологических явлений».
3. Б.С. Степанов, В.П. Молчанов, Т.Л. Киренская «Основные проблемы моделирования селевых процессов»
4. Т. А. Vinogradova, A. Yu. Vinogradov «The Experimental Debris Flows in the Chemolgan River Basin»
5. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 8. Северный Кавказ/ Под ред. Д. Д. Мордухай-Болтовского. — Л.: Гидрометеиздат, 1964. — 309 с.
6. Защита г. Тырнауза КБР от затопления р. Баксан в условиях селевой опасности р. Камык-Су под руководством Э.В. Запорожченко и А.М. Падмя
7. Инженерно-гидрологические изыскания по р. Баддон и моделирование прохождения наносоводных паводков на сопряжении рек Баддон — Ардон для разработки рабочей документации по объекту: Защита территории в долине р. Баддон (Зарамагская ГЭС-1)
8. Ю.Б. Виноградов «Транспортный и транспортно-сдвиговый селевые процессы».
9. Сайт [www. kbrria.ru](http://www.kbrria.ru)
10. Селевые потоки на вулканах. Учебное пособие. – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет/ Черноморец С.С., Сейнова И.Б. - Москва: Издательство УНЦ ДО, 2010. – 72 с.
11. Сайт www.grandars.ru Оползни, сели и обвалы

- 12.РД 52.30.238-90 Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей
- 13.Виноградова Т.А., Никифоровская В.С. О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах. Тр. IV Всесоюз. науч. конф. Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Москва, 15-18 сент. 2015, с.102-106

